



TITLE:

認知工学に基づくヒューマンインタフェース設計法の高度化に関する研究(Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

下田, 宏

CITATION:

下田, 宏. 認知工学に基づくヒューマンインタフェース設計法の高度化に関する研究. 京都大学, 1998, 博士(工学)

ISSUE DATE:

1998-01-23

URL:

<https://doi.org/10.11501/3133242>

RIGHT:

新 制
工
1097

認知工学に基づくヒューマンインターフェース設計法の
高度化に関する研究

平成9年10月

下 田 宏

認知工学に基づくヒューマンインタフェース設計法の
高度化に関する研究

平成9年10月

下 田 宏

論文要旨

原子力プラントに代表される複雑大規模な工学システムでは、その企画・設計から実際の運用に至るまでの各段階で計算機による作業支援が必要不可欠である。しかし、現状では計算機に代表される機械と人間のコミュニケーションが円滑に図られているとは言い難い。特に、複雑大規模な工学システムにおいては、近年そのヒューマンインタフェースの高度化が進んでいるとはいえ、高度な情報処理・判断能力が要求される操作者の作業を有効に支援する段階までは達していない。また、原子力プラントや航空機の設計・運用では、不適切なヒューマンインタフェースが引き起こすヒューマンエラーにより何らかのトラブルが発生した場合、膨大な工数や時間が浪費されるだけでなく、多くの人命を失う致命的な事故に発展しかねない。

本研究では、このような人間と機械の接点となるヒューマンインタフェースを如何にして適切に実現するかという問題に対して認知工学を適用する。すなわち、機械システムの設計・運用において人間－機械の円滑なコミュニケーションを図るため、人間の情報取得・分析・判断・操作などの認知情報処理活動に着目し、その活動に即したヒューマンインタフェースの設計方法を検討し、各種のコンピュータ要素技術を用いて実際にヒューマンインタフェースを構築する。さらに、人間と機械が相互に協調する高次のヒューマンインタフェースである相互適応型インタフェースを実現するための要素技術である人間情報行動計測技術を対象に基礎的な実験研究を行う。

本研究では、まず、大規模工学システムの典型である原子力プラントの設計解析作業を対象として、その解析用シミュレーションプログラムを容易に生成・実行することができるモジュール統合型シミュレーションシステムを開発した。ここでは、シミュレーションプログラム開発の際のモジュール引数の結合、およびシミュレーション実行の際の数値入力データの作成における作業が非常に煩雑であり誤りが起こりやすい。そこで、これらの問題を認知工学の各種の概念を用いて分析し、人間の情報処理活動を支援するという観点から主に人工知能の手法を用いた知識情報処理機能を持つヒューマンインタフェースを構築し、実際に LMFBR 1 次系の核熱流動特性解析作業を行い有効性を検討した。

次に、宇宙用原子炉の概念設計を対象に、その人的作業を支援することを目標として2つの統合型支援ヒューマンインタフェースを構築した。この作業では、未だ存在しない宇宙用原子炉に関する概念モデルの理解とその解析作業が問題となる。支援環境の1つは、この問題に対して仮想現実感を応用することで直観的理解と直接操作を実現している。ここでは、宇宙用原子炉のコンポーネント構成・機能構成・解析計算を仮想空間内で統合的に扱うことができる。もう1つは、前述の支援環境の特長を生かしつつ、複雑大規模な工学システムの設計段階で必要とされる複数の専門家による協同作業を支援するという観点から、機械を介した人間－人間のコミュニケーションに着目して、WWWを応用した非同期分散型協同設計支援環境を構築した。これらの両支援環境について試行例により有効性を検討した。

さらに、上記のようなオフラインでの認知情報処理活動に着目したヒューマンインタフェースだけでなく、オンラインで人間と機械が相互に協調する高次のインタフェースである相互適応型インタフェースを実現するため、人間のオンライン認知情報処理活動を解析する基礎実験を行った。具体的には、被験者に認知活動を伴う課題を行ってもらい、被験者の操作記録・発話記録・視覚系指標・生理指標等と認知情報処理特性との関連性を明らかにした。

本研究では、このようにヒューマンインタフェースにおける人間の認知行動の側面に着目して、人間と機械の最適な関係を構築するための手法について検討し、ヒューマンインタフェースの構築や基礎実験を通して、その有効性を確認した。

認知工学に基づくヒューマンインタフェース設計法の高度化に関する研究 目 次

1 章 序論	1
2 章 認知工学に基づくヒューマンインタフェース設計法	2
2.1 ヒューマンインタフェース研究の展望	2
2.1.1 研究の背景	2
2.1.2 人間－機械交流を支えるコンピュータ技術としてのインタフェース技術と CSCW 技術	3
2.2 認知工学	5
2.2.1 認知科学	5
2.2.2 認知工学のモデルとヒューマンインタフェースへの適用	6
2.3 人間－機械交流の高度化のための技術	13
2.3.1 AI 技術	13
2.3.2 VR 技術（仮想現実感技術）	15
2.3.3 ネットワーク技術	17
2.3.4 人間情報行動計測技術	18
2.3.5 各種のコンピュータ要素技術によるヒューマンインタフェースへのアプローチ	19
2.4 本論文研究の着眼点と研究の範囲	19
2.5 まとめ	20
2 章 参考文献	22
3 章 モジュール統合型シミュレーションシステムにおけるプログラム開発実行支援インタフェースに関する研究	25
3.1 モジュール統合型シミュレーションシステムの構成とヒューマンインタフェース構築のアプローチ	25
3.1.1 モジュール統合型シミュレーションシステムの基本的な方法と構成	25
3.1.2 モデル、モジュール、モジュールライブラリとモジュールデータベース	27
3.1.3 プログラム自動統合	30
3.1.4 MSS におけるヒューマンインタフェース設計上の着眼点	32
3.2 プログラム開発支援インタフェース SESS-1	35
3.2.1 プログラム開発支援インタフェースの構成	35
3.2.2 CRTS による HDL 記述リストの自動生成	37
3.2.3 カラーグラフィックを用いた結線状態の確認修正システム（CGKS）	39
3.2.4 SESS-1 によるプログラム自動生成とプログラム開発効率の検討	40

3.3 シミュレーション実行支援インタフェース SESS-2	42
3.3.1 シミュレーション実行支援インタフェースの構成	42
3.3.2 解析用専門知識の知識ベース化と知識処理の手順	42
3.3.3 自動生成されたプログラムの意味論的診断	48
3.3.4 数値入力データ作成支援	52
3.4 まとめ	58
3章 参考文献	60
4章 宇宙用原子炉の概念設計におけるヒューマンインタフェースに関する研究	61
4.1 宇宙用原子炉の概念設計とそのヒューマンインタフェース構築のアプローチ	61
4.1.1 大規模工学システムの概念設計モデル	61
4.1.2 宇宙用原子炉	62
4.1.3 設計のための解析計算	66
4.1.4 解析計算の結果	73
4.1.5 ヒューマンインタフェース設計上の着眼点	74
4.2 仮想現実感を応用した概念設計支援環境 VINDS	77
4.2.1 仮想現実感環境構築のための技術	77
4.2.2 VINDS の基本的方法とその構成	78
4.2.3 VINDS の機能とその動作検証	85
4.3 WWW を応用した非同期分散型協同設計支援環境 WINDS	95
4.3.1 協同作業としての設計	95
4.3.2 設計共有情報の表現	98
4.3.3 工学解析計算への支援	99
4.3.4 WINDS の基本的方法とその構成	105
4.3.5 WINDS の機能とその検証	108
4.4 まとめ	130
4章 参考文献	132
5章 ヒューマンインタフェースにおける人間のオンライン認知情報処理特性に関する基礎実験研究	133
5.1 実験の目的と着眼点	133
5.1.1 実験の目的	133
5.1.2 心理生理学	133
5.1.3 実験の着眼点	136
5.2 認知心理実験の方法	137
5.2.1 被験者に与える認知課題	137

5.2.2 実験時のシステム構成	143
5.2.3 アイマークレコーダを用いた視覚系指標測定分析法の研究	144
5.2.4 データ解析時のシステム構成	150
5.2.5 実験データのタイムライン表示	151
5.3 実験結果と考察1（操作記録と発話記録）	153
5.3.1 問題の難易度	153
5.3.2 判別課題における手懸かりとなる遷移	161
5.3.3 メンタルイメージ	166
5.3.4 ストレスを与える問題	168
5.4 実験結果と考察2（視覚系データと生理電気信号）	169
5.4.1 サッケード運動	169
5.4.2 注視	173
5.4.3 瞳孔反応	178
5.4.4 瞬目	178
5.4.5 皮膚電位反応（SPR）	182
5.4.6 心拍率	183
5.5 実験データによる認知行動の追跡	184
5.6 まとめ	186
5章 参考文献	189
6章 結論	190
謝 辞	193
図表リスト	194
発表論文リスト	200

付録

付録A SESS-1 の機能検証 : LMFBR 1 次系の熱流動過渡解析

付録B TFE セルでの伝熱特性と電気出力の計算モデル

付録C 宇宙用原子炉の協同設計作業の実際

付録D 瞳孔面積測定用画像処理装置の回路

1章 序論

近年の計算機技術の著しい発展に伴い、身の回りにもコンピュータを用いた多くの機械がみられるようになってきた。インターネットに接続されたコンピュータに代表される情報機器から、航空機やプラント、はてはホームビデオや全自動洗濯機のような家庭電化製品まで、至るところにコンピュータを内蔵した機械が存在し、もはやそれらなしでは我々の生活が成り立たない状況になってきている。これらの機械は、コンピュータという電子頭脳を持つことによって高度な機能を有している。しかしながら、現状では、人間がこれらの機能を十分に使いこなしているとは言い難い。確かに、機械が高機能化されたことで、その制御はより複雑で高度になり、安全性や信頼性の面でも格段の進歩を遂げている。また、日常生活においても、高度な機能を持った家庭電化製品のおかげで生活がより便利になってきている。しかし、その機能を利用しようとする、今までにはない複雑な操作を正確に行うことが必要であり、その操作段階でしばしば間違いが起きてしまうことも多くなっている。日常生活における些細なことについては、あまり問題とはならないが、航空機や船舶、産業プラントで操作の間違いが起きると、取り返しのつかない致命的な事故に発展することもある。

本研究では、このような人間と機械の関係を改善するため、人間側の思考や行動を考慮して、人間と機械の接点であるヒューマンインタフェースを構築することで、このような問題を解決する方法について検討する。すなわち、操作する人間から機械の方に歩み寄るのではなく、機械側から人間に適合させようとするアプローチである。このようなアプローチは、確かに以前から検討されてきたが、人間側の思考や行動の特性が十分考慮されていなかった。本研究では、高度情報化社会での人と機械の関係において、人間－機械の最適な交流形態を実現するため、人間の認知行動に即した交流形態を実現する認知工学に基づいて問題点を分析し、各種のコンピュータ技術を用いてその解決を図るヒューマンインタフェース設計法を検討する。具体的な対象として、モジュール統合型シミュレーションシステムと宇宙用原子炉の概念設計を取り上げ、このヒューマンインタフェース設計法に基づき、実際にそれらのインタフェースを構築する。

本研究では、このような考え方をさらに推し進め、人間－機械の新しい交流形態として、相互適応型インタフェースの枠組みを提案する。相互適応型インタフェースは、人間の各種情報行動をオンラインで計測し、これらの情報から人間の認知状態や負荷状態を推定し、適切な情報や操作ガイダンスを提示することで、人間－機械の高次の協調を図ろうとするものである。本研究では、特に相互適応型インタフェースの基礎となるオンラインで人間の認知状態を推定するための技術に関して基礎実験を行う。以下、2章では、認知工学に基づくヒューマンインタフェース設計法に関して、研究の背景と目的および研究の範囲について述べる。3章では、具体的なヒューマンインタフェース設計・構築の研究として、モジュール統合型シミュレーションシステムのヒューマンインタフェースについて述べる。4章では、宇宙用原子炉の概念設計に関して、人間－機械の交流、および機械を介した人間－人間の交流の2つの観点からのヒューマンインタフェース構築について述べる。5章では、相互適応型インタフェース実現のための基礎となる人間情報行動計測技術に関して、被験者による基礎実験とその分析について述べる。最後に、6章で結論として本研究を総括する。

2章 認知工学に基づくヒューマンインタフェース設計法

2.1 ヒューマンインタフェース研究の展望

2.1.1 研究の背景

近年の計算機技術の著しい発展に伴い、コンピュータに関連して2つの大きな流れがみられるようになってきた。1つは、情報技術の急速な発展に伴い、コンピュータが一部の専門家のものではなく、一般社会に広く普及するようになってきていることである。これは、安価で大容量・高速なコンピュータや通信技術が出現したためであり、コンピュータはもはや家庭電化製品とまで言われている。個人を対象としたパソコンはいまや文房具であり、さらにインターネットを用いた電子メールやホームページからの情報発信など、コンピュータを介した人間のコミュニケーション方法も急速に社会に普及してきている。

もう一つは、化学プラントや発電プラントのような産業用システムの大規模複雑化である。このようなシステムでは、システム内の各種の計測情報が制御室に集められ、それによって集中的に制御される。

以上、2つの現代のコンピュータ化の傾向を人間と機械システムとの関係でみると図 2-1のようになる。図では、コンピュータを介する機械システムとのコミュニケーションのほかにネットワークを介した人と人のコミュニケーションの各形態を示している。

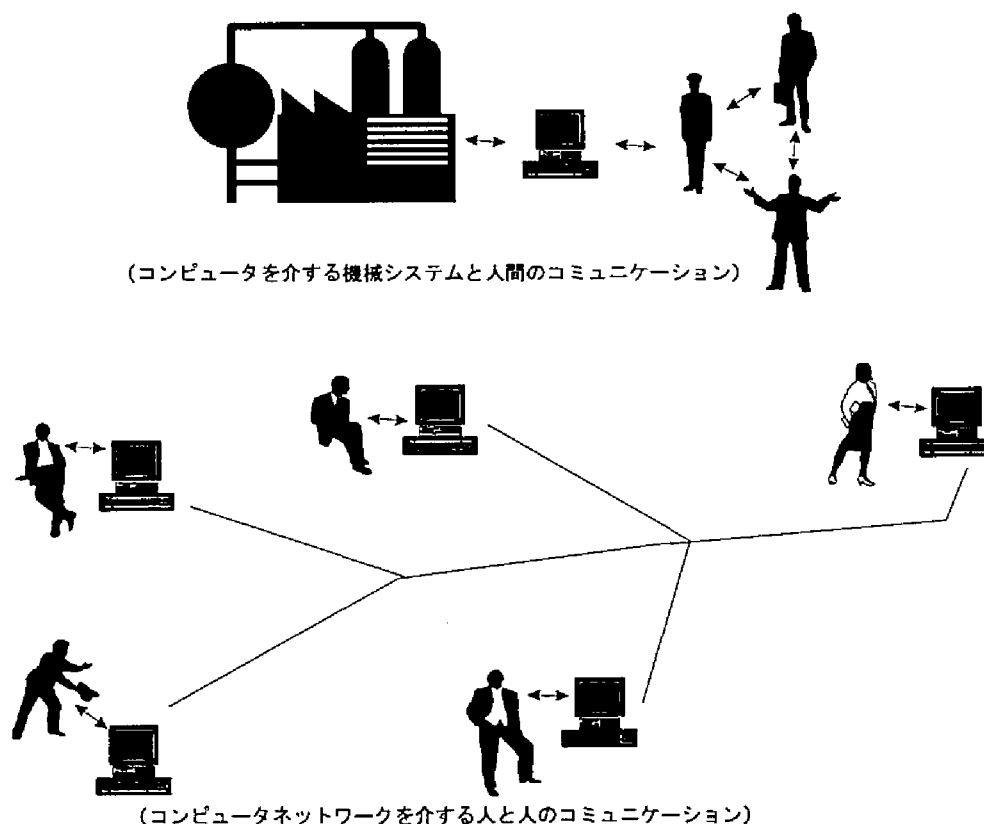


図 2-1 社会における人間と機械システムの関係

しかしながら、ネットワークに接続されたコンピュータに代表される情報技術の急速な発展・社会への普及により、情報が社会に氾濫しており、必要な情報の取捨選択が難しくなっている。また、高度化する情報機器のすべてを使いこなすには、人間の能力の範囲を超えた複雑な操作が必要である。パ

ソコンを買ったのはいいが、使い方が複雑すぎて結局インテリアになっているという話もよく耳にする。

一方、大規模システムにおいても本質的に同様な問題をかかえている。システムの大規模化に伴い、各種の制御情報が制御室に集中し、その制御が複雑になってきた。このような大規模システムの多くは、エネルギーや危険物質の大規模な集積を伴い、その加工処理の安全な制御を使命とする。したがって、その誤動作は、システムそのものや操作者だけでなく、周囲の環境や一般公衆に対しても致命的な結果をもたらすこともある。事故を防ぐために、大規模システムでは自動安全システムが導入されているが、実際には多くの事故が発生している。そして、事故後の分析においては、その多くでオペレータの過失が原因であったという指摘がなされ、ヒューマンエラー対策の必要性が指摘されている。大規模プラントの典型である原子力プラントでは、TMI-2 号機やチェルノブイリ発電所の事故のように、その大規模な事故は、周辺のみならず、地球規模で深刻な状態を招きうることもある。確かに、これらの事故によって、操作員の役割やその支援体制に対して多くの研究がなされるようになってきているが、大規模な中央集中制御型システムの本質的な問題は、ごく普通の人的過失が途方もない損失を招きうることである。

本研究では、このような高度情報社会での人と機械の関係において、人間－機械の最適な交流形態を実現するために、ヒューマンインタフェース技術の高度化を目指す。そのために、人間－機械の間に位置するヒューマンインタフェース技術だけでなく、機械を介した人間－人間のインタラクションを実現する CSCW(Computer Supported Cooperative Work)技術において、特に人間の認知行動に即した交流形態を実現する認知工学的なアプローチから研究を進める。以下、本節では、人間－機械の最適な交流形態を実現するための各種のコンピュータ技術を概観し、認知工学とそれに基づいた各種技術の応用、さらに高度なヒューマンインタフェースとしての相互適応型インタフェースへの展望について述べる。

2.1.2 人間－機械交流を支えるコンピュータ技術としてのインタフェース技術と CSCW 技術

人間－機械のインタラクションを実現するインタフェース技術の分類を図 2-2 に示す。人間に情報を提示する CRT のような出力装置やキーボード・マウスのような入力装置であるインタフェースデバイス技術を基本とし、さらに人間の思考や推論と調和させるための情報処理法としての AI 技術、人間の感覚や操作の上でより自然な VR 技術等の要素技術から構成されている。この VR 技術も、さらに臨場感提示技術、シミュレーション技術、行動計測技術などに支えられている。

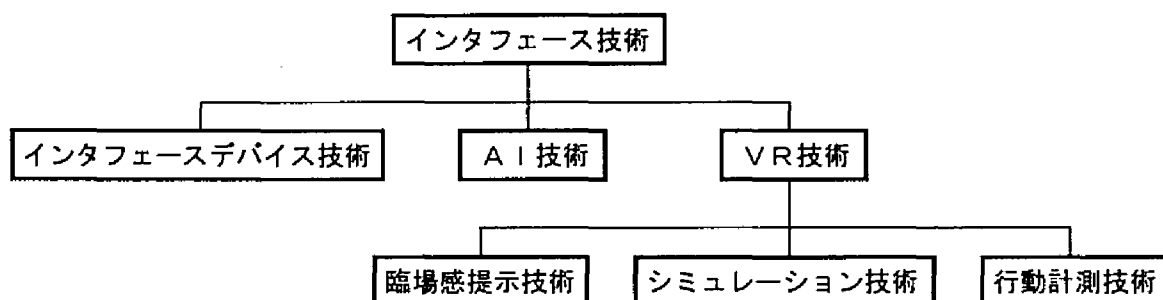


図 2-2 インタフェース技術を構成する要素技術

一方、機械を介した人間－人間のインタラクションを実現する CSCW 技術は、図 2-3 に示すように、インタフェース技術はもとより、インターネットや通信回線をはじめとするネットワーク技術や認知科学や社会心理学などを基礎とする人間の協調メカニズムを要素技術としている。

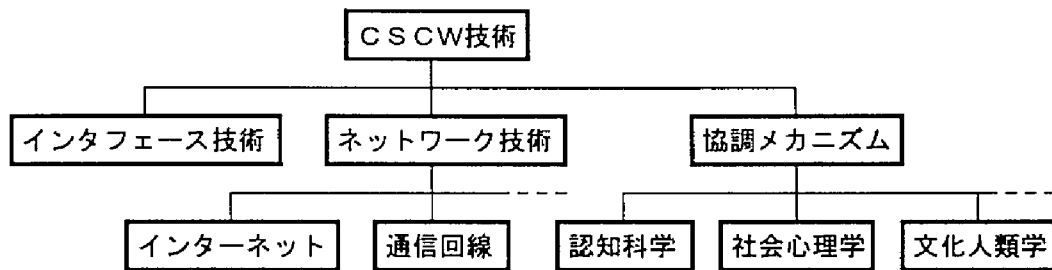


図 2-3 CSCW 技術を構成する要素技術

図 2-3において、特にそれぞれの個別技術を生かして、人と人、人と機械の「協調」を図る方法の創出が重要である。すなわち、人間－機械交流技術を支えるのは、コンピュータ技術だけではない。人間が関与してくる限り人間側の行動についても分析し、そのメカニズムを解明することで機械側との最適な関係を実現することが必要である。このような考え方により生まれたのが「認知工学」である。認知工学(Cognitive Engineering)は、D.A.Norman により初めて用いられた言葉で、彼は、「認知科学の分野で得られたことを機械の設計や製作に適用する一種の応用認知科学(Applied Cognitive Science)である」と述べている^[1]。Norman は人間の視点に立って機械を設計することの重要性に注目し、人間が達成しようとしているタスクの視点からシステムを評価すべきであるとしている。

このような観点から、本研究では人間－機械システムの例を取り上げ、その最適なヒューマンインタフェースを設計するための要素技術の構成を認知工学の立場から検討し、実際にそれらを用いてヒューマンインタフェースを構築する。具体的には、原子炉プラントを対象としたシミュレーションプログラム生成と宇宙用原子炉の概念設計を対象とする。

シミュレーションプログラムの生成は、原子炉プラントを対象とした解析用シミュレーションプログラムを、モジュールと呼ばれるプログラム部品を結合することにより自動的に生成するものである。この問題に対しては主に前述のインタフェース技術、特に AI 技術を用いてヒューマンインタフェースを構築する。一方、宇宙用原子炉の概念設計については、次の 2つの観点からヒューマンインタフェースを構築する。一つは、宇宙用原子炉という現実には存在しないものを表現するために VR 技術を用い、これにより直観的理解と直接操作を特徴とするヒューマンインタフェースを構築する。一方、宇宙用原子炉の概念設計は、核特性をはじめ、材料物性、熱力学など複数の専門家の協同作業が必要となるため、インターネットを用いた CSCW 技術による機械を介した人間－人間のコミュニケーションを重視したヒューマンインタフェースを構築する。

また、本研究では、さらに高度なヒューマンインタフェース技術として相互適応型インタフェースの構成を提案し、その確立を目指して基礎研究を行う。従来のインタフェースでは、機械システムを適切に操作するためには、ユーザがその操作方法を習得し、機械システムの状態を常に把握すること必要であった。即ち、人間が本来持っている適応能力を使って機械システムの操作環境に「適応」しなければならなかった。相互適応型インタフェースは、逆に機械システム側からも人間に「適応」することで人間側の負担を低減し、円滑な交流形態を実現しようとするものである。具体的には、人間の各種情報行動をオンラインで計測し、これらの情報から人間の認知状態や負荷状態などの内面状態を推定し、適切な情報や操作ガイダンスを提示することで、人間－機械のより高次の協調を図ろうとするものである。図 2-4にその枠組みを、図 2-5に要素技術を示す。図 2-5に示すように、相互適応型インタフェースは、人間情報行動計測技術、ヒューマンモデル技術、情報提示技術の要素技術で構成しようとするものである。本研究では、特に、相互適応型インタフェースの基礎となるオンラインでの人間の認知情報処

理活動を推定するために、各種の生理指標、視点位置や瞬目などの視覚系指標、発話情報等と内面状態との関連性を基礎実験により研究し、多角的生理指標の計測処理法の人間情報行動計測への有効性を実験的に検討することを目的としている。

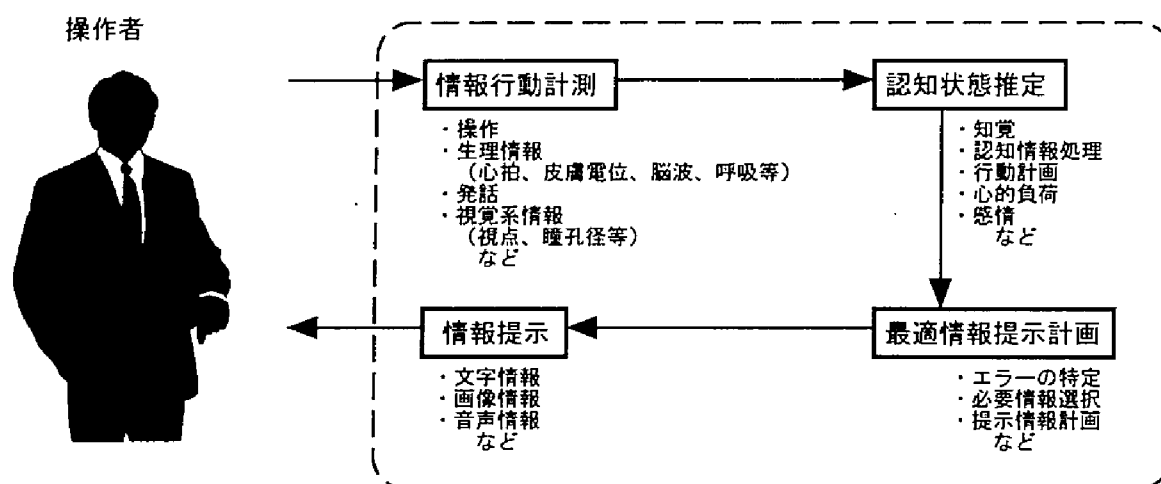


図 2-4 相互適応型インタフェースの枠組み

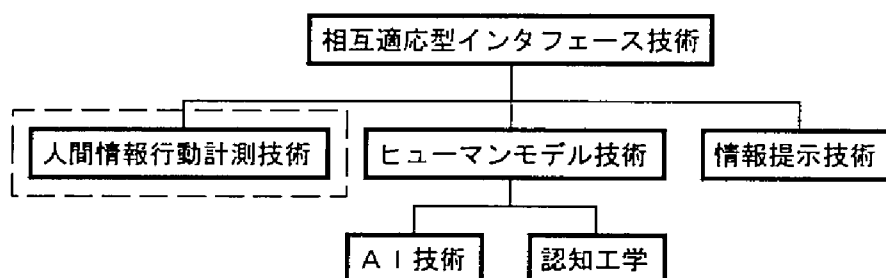


図 2-5 相互適応型インタフェースの要素技術

以下、2.2 節で前述の認知工学について概説し、2.3 節で人間－機械交流の高度化のための機械側の技術に触れ、最後に 2.4 節で、本研究の目的と範囲を述べる。

2.2 認知工学

ヒューマンインタフェース設計法の高度化のためには、人間に関する科学や知見が重要な要素である。本節では、特に本研究を行う上で人間の認知過程の解明を目指す認知科学やこれを応用した認知工学の種々のモデルを概説し、これらのヒューマンインタフェースへの適用のあり方について展望する。

2.2.1 認知科学

認知科学とは、人間の「知 (Intelligence)」の仕組みや働きを解明しようとする科学であり、その対象は、視覚や聴覚などの知覚の問題から、記憶、学習、判断、思考まで、人間の知的活動の過程すべてを含むものである [2][3]。認知科学のアプローチについては、大別して情報处理的アプローチと生態学的アプローチがある。以下では、それぞれについて概説する。

2.2.1.1 情報処理的アプローチ

情報処理的アプローチの最大の特徴は、人間を一種の情報処理システムとしてとらえるという考え方である[4]。この立場では、

- 人間の認知活動は、基本的には記号処理プロセスである
- そのプロセスは、少しの情報を一時的に保持する短期記憶と多くの情報を永続的に保持する長期記憶に基づいている
- このプロセスは、コンピュータの内部で行われる記号処理と同じである

という考え方に立っている。このアプローチでは、人間の情報処理過程のある側面を図 2-6 のように入力と出力の関係でとらえ、その内的処理を知覚や記憶のモデルとして表現し、コンピュータ上でシミュレーションして、人間による定性的、定量的実験データと照らし合わせてその妥当性を検証する。このような情報処理的アプローチは、認知科学の発展だけでなく AI 技術にも大きく貢献している。

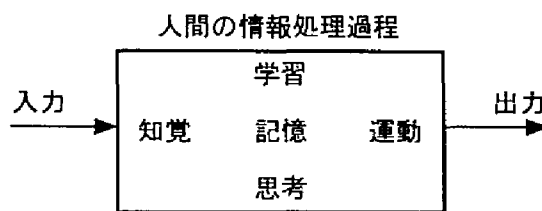


図 2-6 認知科学の情報処理的アプローチ

2.2.1.2 生態学的アプローチ

一方、認知科学における異なったアプローチとして、生態学的アプローチがある。この生態学的アプローチでは、「ある環境や状況全体が人間に働きかけて、ある行為を妥当であると感じさせる」場合がよくあることに注目し、そのような環境や状況のもつ妥当性や人間の環境適応性を重視しようという立場に立つ。この立場においては、J.J.Gibson の生態学的視覚論[5]がよく知られており、彼は、「生体の知覚は感覚的な入力の内情報処理によるのではなく、生態学的に重要な情報を外界から直接抽出している」と主張している。また、H.A.Simon も「行動するシステムとしてとらえた人間は、はなはだ単純なものである。時間を追って現れる表面上の行動の複雑さは、主にその環境の複雑さを反映している」としている[6]。このような考え方では、人間が入力に対して単に反応しているだけではなく、関連情報を能動的に求めるために入力情報の中の重要な特徴に常に感覚器を向けていて、現在ある情報だけでなく、見えない情報についても反応するとしている。つまり、人間は環境からの入力情報を処理しているだけではなく、現在の要求とゴールという文脈において関連する情報を能動的に拾い上げている。

最近では、このような生態学的アプローチと前述の情報処理的アプローチを融合しようとする動き、すなわち、認知の情報処理過程を生態学的にアプローチしようという動きもある。

2.2.2 認知工学のモデルとヒューマンインタフェースへの適用

次に、このような認知科学を基礎とした認知工学の種々のモデルについて述べる。認知工学では、対象とする問題によって、様々なモデルや考え方が提唱されている。本項では、代表的なものを概説し、最後にヒューマンインタフェースへの適用についてまとめる。

2.2.2.1 実行の淵と評価の淵

D.A.Norman は、人間が使用する機械を設計する際には、ユーザの視点に立って設計することの重要性に注目し、ユーザが達成しようとしているタスクの視点からシステムを評価すべきであると主張している[1]。つまり、普通、設計者は自分の持っているデザインモデルをもとにシステムイメージを作り上げる。一方、ユーザはシステムと接することにより、いわゆるシステムの「メンタルモデル」を作り上げ、それをもとにシステムを使用する（メンタルモデルについては後述）。このとき設計者が考慮すべき最大の問題はユーザに適切なメンタルモデルを与えられるように設計を行っていくことである。さらに、彼は、ユーザの目標達成のプロセスを分析し、ユーザの心理的状态である「ユーザの目標」と物理的なレベルで記述される「システムの物理的状态」との隔たりに注目し、これを淵(gulf)と呼んでいる。図 2-7に示すように、ユーザが目標を達成する動作を決定する際には、心理的目標から物理的動作に至る実行の淵(gulf of execution)を越えねばならず、逆にシステムの状態を理解するときには、物理的状态から心理的理解に至る評価の淵(gulf of evaluation)を越えなければならない。実行の淵を越えるためには、意図、行動選択、実行の各段階が必要であり、評価の淵を越えるには、知覚、解釈、評価が必要である。これらの淵を越える努力が小さいシステムがユーザにとって使いやすいシステムであるとしている。

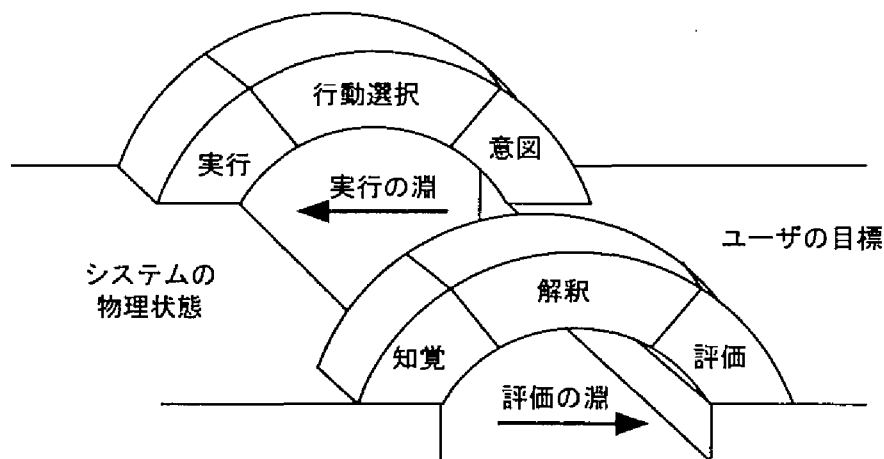


図 2-7 実行の淵と評価の淵の間の橋 (D.A.Norman による)

2.2.2.2 機能の階層的表現

上述のような考え方は、J.Rasmussen も機能的な面から提唱している[7]。彼は、監視制御システムにおける意志決定の際に、人間が物理的なシステムの機能をどのようにとらえているかを、抽象度の階層によって表現している。認知科学の生態学的アプローチでも述べたように、システムの機能的特性が操作者によってどのように知覚されるかは、その人の目標と意志によって決まる。そのため、監視制御を行う操作者にとって物理的なシステムがどのように認知されているかを構造化して表現し、その枠組みの中で人間-機械の関係を考えることが重要である。監視制御での意志決定にとって有効なのは、機能的な抽象度の階層における手段-目的関係に従ったシステムの機能的な特性の記述である。抽象度の階層の記述は、図 2-8のように2つからなる。1つは、ボトムアップ的な記述であり、どのような構成部分や機能が使えるのか、それはどのように所定の目的に役立つのが問題となる。もう1つは、トップダウン的な記述であり、所定の目的をどのようにして機能や構成部分によって実現できるのが問題

とされる。このような枠組みに従ってシステムを記述することにより、システムを操作するために必要な制御タスクを記述できるだけでなく、操作者が監視制御する際の認知行動の追跡や、機能的なメンタルモデルの階層的記述にも用いることができる。

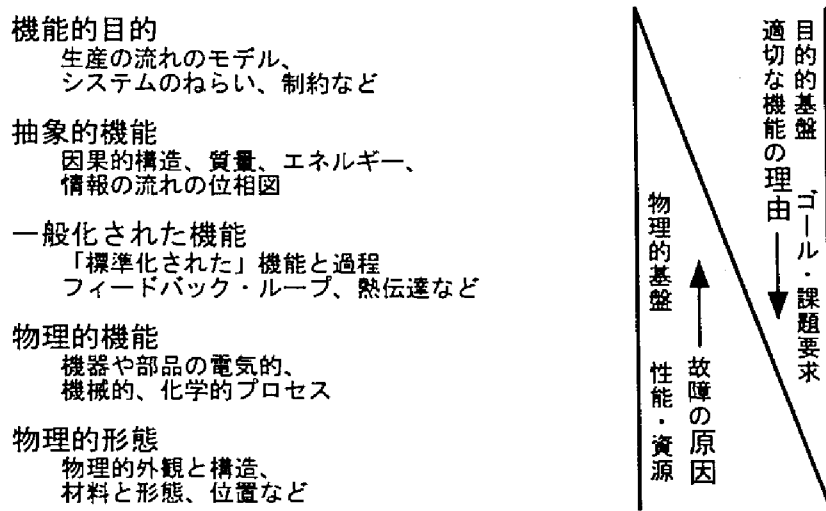


図 2-8 物理システムの機能的特性を対象とした抽象度の階層的表現(J.Rasmussen による)

2.2.2.3 パフォーマンスモデル

人間の認知行動のモデル化という観点から考えると、前述の認知科学における情報処理的アプローチを代表するものとして、S.K.Card らが提唱している人間の情報処理モデルがある[8]。このモデルは、人間の情報処理過程を分析・予測するための基本的枠組みであり、定量的に記述されているところに最大の特徴がある。彼らのモデルでは、人間の情報処理過程は、図 2-9に示すように知覚システム、認知システム、運動システムの3つの部分により構成される。

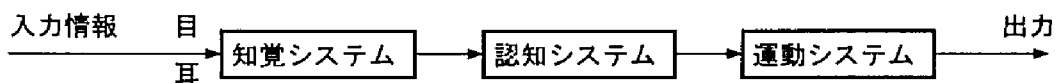


図 2-9 人間の情報処理過程のモデル

各システムは、プロセッサとメモリにより構成される。すなわち、知覚システムは、知覚プロセッサと視覚イメージストアおよび聴覚イメージストアの2種類のメモリからなり、認知システムには、認知プロセッサと短期記憶および長期記憶がある。また、運動システムには、メモリはなく、運動プロセッサがその処理を行う。これらのプロセッサとメモリは、図 2-10のようなパラメータで記述される。

プロセッサについては、その処理の最小単位をサイクルタイムと呼び、 τ で表す。一方、メモリは下記のように、蓄積容量 μ 、減衰時間 δ 、コードタイプ κ の3つのパラメータで表される。

μ : 蓄積容量 (文字数などの項目数)

δ : 減衰時間 (50%になるまでの時間)

κ : コードタイプ (物理的、音響的、視覚的、意味的の4つのうちの1つ)

これらのプロセッサやメモリのパラメータは、個人差や状況によって異なるが、予測に利用できるように、典型値と最大値、最小値を「典型値[最小値～最大値]」の形で与えている。このような S.K.Card らのモデルは、実測ともよく一致し、同じ行動を繰り返すときのパフォーマンスモデルとして予測にも

用いることができるという点で非常に有効であるが、エラー時の行動などは考慮されていない。

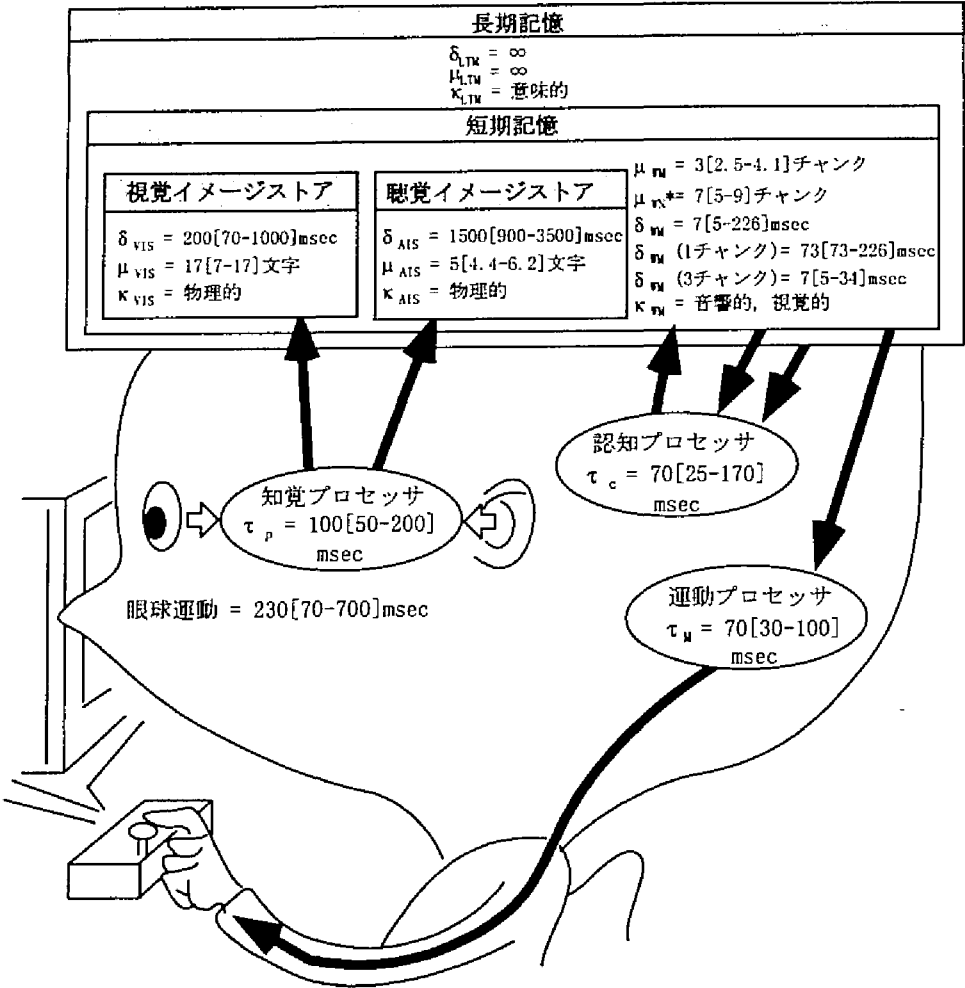


図 2-10 ヒューマンパフォーマンスモデル (S.K.Card らによる)

2.2.2.4 ヒューマンエラーモデル

ヒューマンエラーを予測し防止することは、人間—機械システムを設計する上で非常に重要である。ヒューマンエラーとは、一般に人間の過ちをいい、表 2-1のように分類される[9]。

表 2-1 ヒューマンエラーの分類

エラーの分類	行動の意図	解 説
スリップ	意図しない行為	注意の失敗 干渉・省略・逆転・順序の誤り・タイミングの誤り
ラプス		記憶の失敗 計画項目の省略・場所の見失い・意図の喪失
ミステイク	意図した行為	ルールベースのミステイク 正しい規則の誤適用・誤った規則の適用 知識ベースのミステイク 多様の変動形式

スリップとラプスはその行為が意図によらないものであり、ミステイクはその意図が間違っていたものである。このミステイクについては、表 2-1 中の解説に示すように、ルールベースのミステイクと知識ベースのミステイクがある。一方、J.Rasmussen は、人間と機械とのインタラクションにおける諸相を図 2-11 のような人間行動モデルとして描写している[7]。

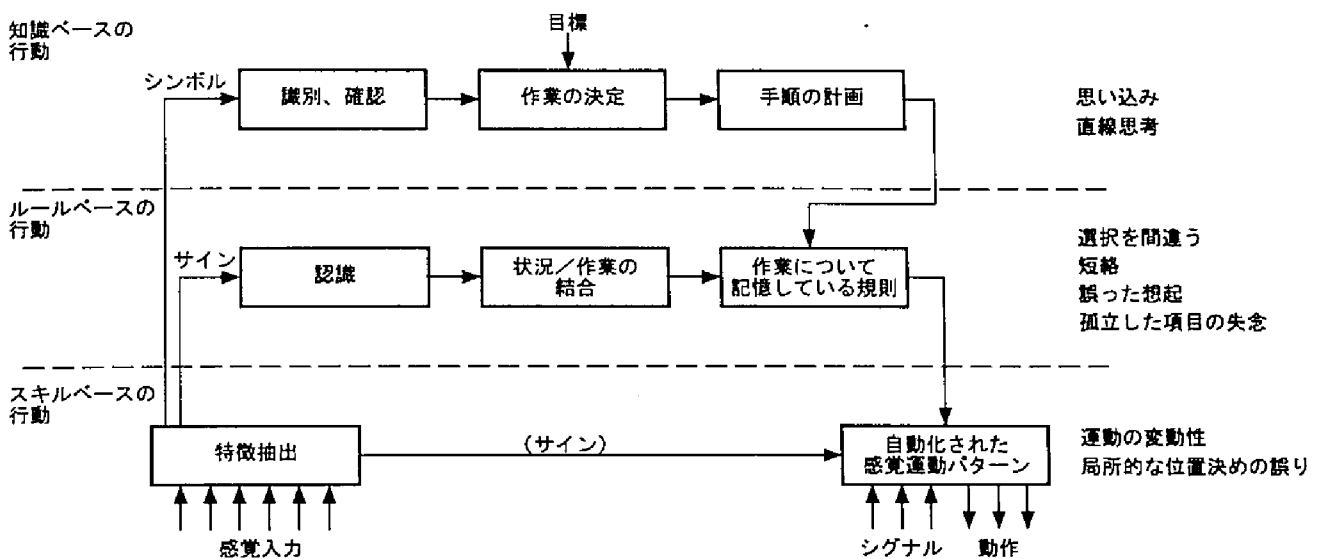


図 2-11 人間の行動モデルとヒューマンエラーの関係(J.Rasmussen による)

人間の行動をシステムの制御に関して記述すると、スキルベース、ルールベース、知識ベースの3つの典型的な行動レベルが現れてくる。スキルベースの行動は、熟練した行為や活動における感覚運動パフォーマンスを表し、意図により自動的に滑らかな行動パターンとして実行される。ここでのヒューマンエラーは運動の変動性や局所的な位置決め誤りに起因するものである。ルールベースの行動は、過去の経験で獲得されたルールやノウハウとして伝えられた手続きによって、意識的に制御されているものである。ここでのヒューマンエラーは、ルール選択の誤り、短絡、誤った想起、確立した項目の失念などに起因する。一方、不慣れな状況において直面する問題に対しては、過去の経験やルールが存在しないため、さらに高次の概念レベルである知識ベースに移行する。知識ベースの行動は、ある目標によって制御され、概念的・構造的モデルで表される知識が用いられる。ここでのヒューマンエラーは、思い込みや直線思考に起因する。このようなヒューマンエラーの分類とそのモデル化は、特に、医療装置、原子力プラント、航空機などのように、誤りによって致命的な損失が生じるようなシステムに対して有効である。

一方、上記のような人間の認知行動や誤りのモデル化ではなく、人間の理解や納得、思考の構造に関しても多くの研究が行われている。以下では、そのような観点での「ヒューマンモデル」として、D.A.Norman によるメンタルモデルの考察と M.Lampert による納得世界の構造について述べる。

2.2.2.5 メンタルモデル

メンタルモデルとは、あるシステムに対してユーザがその頭の中に持っているモデルであり、そのシステムを使用することにより形成されるものである。つまり、メンタルモデルは、ユーザの過去の経験

やシステムとの関わり方によって異なり、しかも時間とともに変化していく。技術的なモデルのように必ずしも正確である必要もないが、ある限定された局面において機能的な役割を果たす。D.A.Normanによると、メンタルモデルのもつ性質として次の6つを取り上げている[10]。

- (1) 不完全である
- (2) 非常に限定された形でしか動かせない
- (3) 不安定である。しばらく使わないと忘れてしまったりする
- (4) はっきりした境界をもたない
- (5) 非科学的である
- (6) ささやかなものである

このように、漠然としたモデルではあるが、システムをうまく運用していく上で重要な役割を果たしていると考えられる。このメンタルモデルが具体的にどのような形態をとっているかや、そのモデルからどのような形で有用な知識が導かれるかについても研究が行われている[11][12][13]。

2.2.2.6 納得世界の構造

一方、人間がある事柄を理解して納得する場合、その納得世界の構造は、M.Lampert によると、図2-12のように4つの世界から構成されている[14][15]。

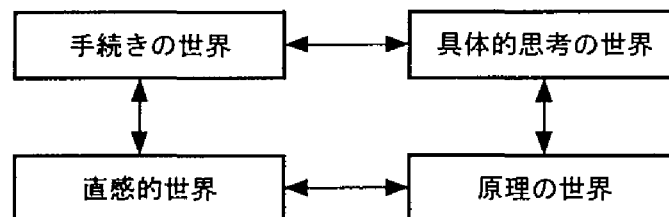


図 2-12 納得世界の構造(M.Lampert による)

以下では、これら4つの世界について説明する。

手続きの世界

いわゆるハウツーの世界であり、アルゴリズムに対応する。ある目的のためのやり方を手順として知っているという意味で納得していることに相当する。

直感的世界

常識的な経験世界のことであり、結果的には論理性に従っているが、行為自身に必然性が伴っていることをいう。この直感的世界は実務においてはもっとも重要な納得世界であると思われる。

原理の世界

これは法則や理屈の世界であり、その代表例としては、物理の世界が挙げられる。この世界の特徴は「状況に依存しない」、つまり一つの整合した閉じた世界を形作っていることである。

具体的思考の世界

具体的なものを操作するなかで理解していく世界をいう。実際に触ることができる人工的簡易モデルを用いて、複雑な仕組みを理解するのもこれにあてはまる。

対象を本当に理解するためには、これらの4つの世界を行き来する多元的な理解や納得が必要である。

2.2.2.7 人間と機械の役割分担

上記のような枠組みのなかで、人間とコンピュータの役割分担を考える上で、人間の得意なことを見極めることが必要である。以下では、ヒューマンインタフェースを構築する上で、人間とコンピュータの最適な役割分担を実現するために、人間が主に得意とする思考や推論について考察する[16]。

気配情報の処理

符号化する前の情報の処理やモニタリングに関して人間の能力は非常に優れている。はっきりした理由がわかっていなくても過去の経験から結構正しい判断をしている場合が多い。つまり、周りの状況を総合的に判断して決定を下すことについては人間の方が優れている。これらの機能は無意識的レベルで働いており、それを支えるメカニズムは大容量の並列処理神経回路網であるとされている。

オーバーラップする表現の処理

いくつかの表現がオーバーラップしている場合、それらを統合してつきあわせ、一つのものとして解釈するのは人間の得意とするところである。また、いくつかの知識が存在して、その一部がオーバーラップしている場合にも、それを検知するのはコンピュータではなかなか困難であり、人間の方が得意であると考えられる。

常識（定性的、直感的な処理）

常識による処理も人間はごく自然に行ってしまうが、コンピュータではなかなかうまくいかない。常識は、基本的には膨大な経験のデータベースによる定性的なものであり、定性的なものの違いを見極める能力が人間の場合優れているといえる。

このように、人間がもっている能力を見極め、それに従って機械との役割分担を切り分けることが重要である。

2.2.2.8 認知工学によるヒューマンインタフェースへのアプローチ

ここでは、前述した認知工学の各モデルや概念について、その特徴とヒューマンインタフェースへ適用する際のアプローチの方法についてまとめる。表 2-2に各モデルとその特徴、およびヒューマンインタフェースへ適用する場合のアプローチを示す。

表 2-2 認知工学のモデルとヒューマンインタフェースへの適用

モデル、概念	特 徴	ヒューマンインタフェースへの適用
実行の淵と評価の淵	システムの物理状態とユーザの目標の隔たりをモデル化	各段階で隔たりを小さくするようにインタフェースを設計
機能の階層的表現	システムの機能的な特徴を抽象度の階層として表現	必要な制御タスクの記述、認知行動の追跡、機能的メンタルモデルの記述
パフォーマンスモデル	人間の情報処理を定量的にモデル化	パフォーマンスを予測
ヒューマンエラー	人間の誤りを分類、モデル化	人間の誤りを防止
メンタルモデル	システムに対する人間の理解モデル	適切なメンタルモデルを与えられるように設計
納得世界の構造	理解の構造について分析	システムに対する理解過程を支援
役割分担	人間のもつ能力に着目	システムと人間の役割の切り分け

この表からもわかるように、ヒューマンインタフェース設計の問題について、すべての場合に適用できるモデルはなく、その問題に合わせて適切なモデルを選択し、設計を進めていくことが重要である。

本節で述べたように、ヒューマンインタフェース設計法の高度化のためには、人間に関する科学や知見が重要な要素であり、上記のような認知科学に基づく認知工学をヒューマンインタフェース設計に反映することにより人間－機械の最適な交流形態を実現できると考えた。

2.3 人間－機械交流の高度化のための技術

本節では、人間－機械交流の高度化のための機械側の技術を、人間－機械の実際の接点となる（１）インタフェース技術、機械を介した人間－人間の交流に寄与する（２）CSCW 技術、および次世代のインタフェース技術である（３）相互適応型インタフェース技術に分類し、そのそれぞれの核となる要素技術について概説する。

（１）インタフェース技術

インタフェースデバイス技術はもとより、高度なインタフェース機能を実現するためには図 2-2 に示したように AI 技術、VR 技術が有効である。

（２）CSCW 技術

CSCW 技術は、上述のインタフェース技術だけでなく、図 2-3 に示したようにネットワーク技術、人間の協調メカニズムなどが必要不可欠である。

（３）相互適応型インタフェース技術

相互適応型インタフェース技術は、次世代のより高度なヒューマンインタフェース技術であり、その枠組みと要素技術は図 2-4、図 2-5 に示した。前述のように本研究では、その基礎となる人間の内面状態の推定をオンラインで行うための人間情報行動計測技術を確立するための基礎実験研究を行う。

以下では、上記のように本研究で特に着目した技術について概説する。

2.3.1 AI 技術

本項では、知識と推論に基づいたソフトウェアに人間の知識情報処理に類似した動作をさせることで、コンピュータに人工の知能を持たせようとする AI 技術について述べる^{[17][18][19]}。AI 技術と一言でいっても、その内容は、知識表現、知識獲得、推論、学習、論理プログラミングなど多岐にわたるが、ここではその実用性が注目されているエキスパートシステムについて述べる。エキスパートシステムとは、ある特定分野の問題解決のために専門家が持っている知識をコンピュータ上にソフトウェアとして実現し、人間と同等の問題解決能力を持たせることを目指したシステムをいう。このようなエキスパートシステムをソフトウェアアーキテクチャとしてみた場合の最大の特徴は、特定の専門分野の知識を蓄積する知識ベース部と汎用の推論機構をもつ推論部が分離されていることである。そのため、通常は図 2-13 のような構造をもつ。

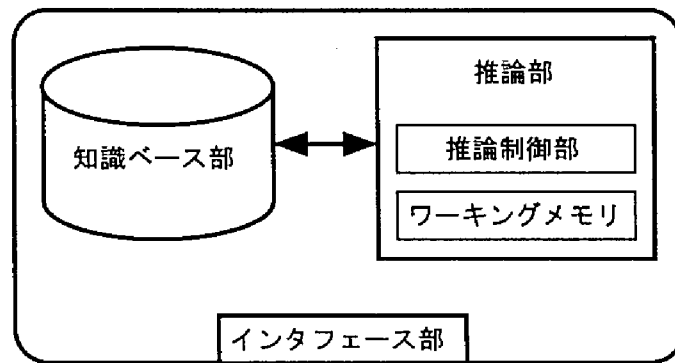


図 2-13 エキスパートシステムの構造

このうち対象知識を格納する知識ベースは次の3種類に大別できる。

- 宣言型知識 …………… ある事柄が真か偽かを示す事実的知識
- プロダクション型知識 …………… プロダクションルールで記述される知識
- 相互関係型知識 …………… 意味ネットやフレームなどのように、いくつかの事柄の相互関係を記述した知識

一方、推論部は、これらの知識を用いて推論を進めていく部分で、一般に前向き推論と後ろ向き推論がある。前向き推論は、知識をプロダクションルールで記述している場合、図 2-14 の例でいうと、ある事実 A_0 から出発して、知識として記述されたルールを参照して A_n の結論を導き出すものである。一方、後ろ向き推論は、逆に結論である A_n が与えられれば、そこからルールをたどってある事実を導き出すものである。

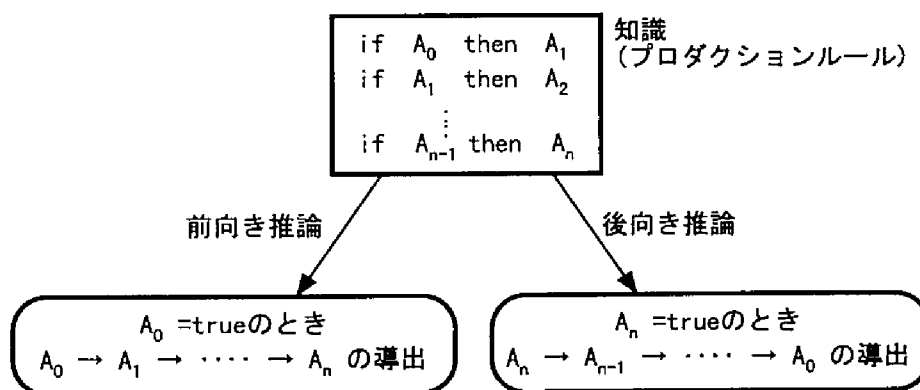


図 2-14 エキスパートシステムの前向き推論と後ろ向き推論

知識ベースが大きい場合には、場合分けの数が非常に多くなってしまい、高速な推論を実現するためには、推論制御部で可能性のあるパスを如何に限定するかが課題となる。また、インタフェース部は、開発する立場から知識を入力するための知識獲得支援と、利用する立場から推論結果の推論理由を説明する機能からなる。この説明機能により、利用者に推論結果がどのようにして得られたかを推論過程をトレースすることで示すことができる。

以上のような構造をもつエキスパートシステムが適用される問題のパターンは、表 2-3 のように分類できる [20]。

表 2-3 エキスパートシステムの問題パターン

解析型	解釈問題	波形を分析して分類
	診断問題	兆候より異常箇所を特定
	制御問題	思い通りに動作するよう操作量を決定
合成型	計画問題	リソースの割り当てスケジュールの決定
	設計問題	入出力仕様に合う構成要素の組み合わせの決定

解析型の問題は、システムの構造が与えられたときに、あるシステムの特徴を導き出すものである。合成型の問題は、逆にシステムの特徴が与えられたときに、システムの構造を決定する問題である。解析型の問題は、さらに解釈型、診断型、制御型に分類できる。解釈型というのは、ある波形を分析してシステムの状態などを推定する問題で、たとえば音声の認識などが挙げられる。診断型は、システムに異常が発生したときに観測されたデータから異常箇所を特定する問題である。制御型は、システムの状態を監視して思い通りにシステムが動作するように制御する問題である。一方、合成型の問題は、計画型と設計型に分けられる。計画型は、ある目的を達成するためにリソースの割り当てスケジュールを決定する問題であり、設計型は、システムの入出力仕様が与えられたときに、それを実現する構成要素の組み合わせを決定する問題である。いずれのタイプの問題も従来より制御理論や数理計画法などを用いて成果をあげてきている。

このようにエキスパートシステムは人間の持つ経験的な知識をコンピュータに取り込むことにより従来のアルゴリズム主体のシステムから一段進んだ知的システムの構築を可能にした。しかし、エキスパートシステムの基本的な構築法は確立しているとはいえ、課題も多い。以下では、エキスパートシステムのもつ課題を列挙する。

- 知識獲得の問題
- 未想定状況への対応の問題
- 知識の完全性維持の問題
- 推論の高度化の問題
- 知識表現の実装の問題

以上、AI 技術を概説したが、最近では、人間の機能を代行する「代行型 AI」から、人間の高度な情報処理機能を支援する「交流型 AI」へと移行しつつある。代行型 AI は、人間が行う知的作業のうち、ルールベース行動や一部の知識ベース行動をコンピュータが代行することにより、人間の作業負担を軽減するものである。一方、交流型 AI は、コンピュータが代行できないような知的作業に対しても、その際の情報収集や整理、関連知識の提示などで作業支援を行うものである。本研究では、代行型 AI はもちろんのこと、交流型 AI についても積極的に取り入れてヒューマンインタフェースを構築する。

2.3.2 VR 技術（仮想現実感技術）

仮想現実感とは、人間がいま現在、実際に存在している環境以外の仮想環境を、あたかもそれが現実の環境のような感覚をもって体験し、かつその仮想環境で行動することを可能とすることを目指した技術の総称である[21][22]。この技術を用いたシステムは、図 2-15に示すように 3つのサブシステムから構成される[23]。

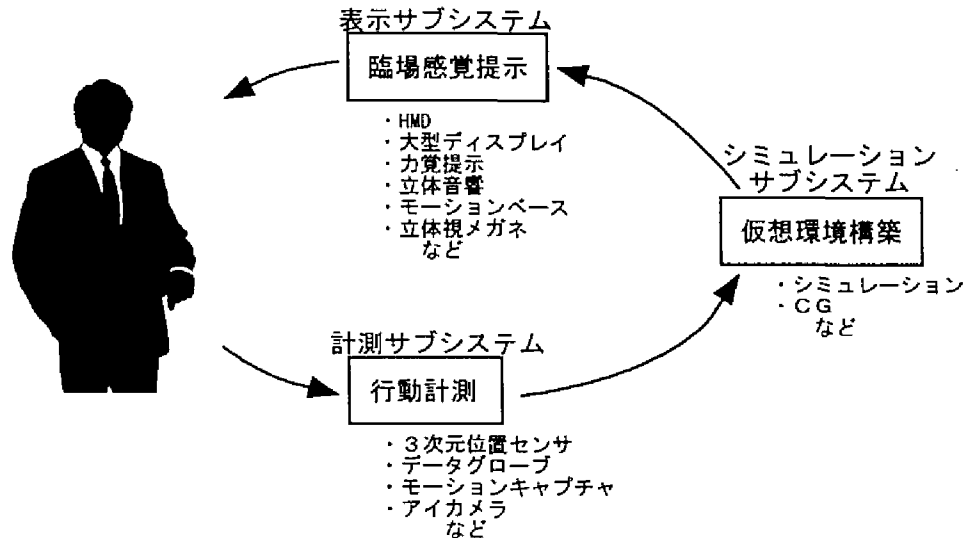


図 2-15 VR 環境の基本構成

まず、第1に仮想の世界を人間に臨場感あふれる「表示」を行うための「表示サブシステム」、第2に人間の動作を「計測」することで計算機に直接入力するための「計測サブシステム」である。表示サブシステムと計測サブシステムにより、人間と仮想現実とのインタフェース構築が可能になるが、さらに必要なのが仮想空間を計算機内に構築するための「シミュレーションサブシステム」である。次にそれぞれのサブシステムについて説明する。

表示サブシステム

人間の感覚には、取得する外部情報の大部分を扱う視覚以外に聴覚、触覚、味覚、嗅覚という五感があり[24]、表示サブシステムは、「表示」という言葉から連想する視覚に対して情報を提示するだけでなく、人間の五感に対して情報を提示するシステムをいう[23]。嗅覚、味覚に関しては化学的な反応をもとにしているので、実際に得られたものを分析してそれを合成するという形をとらないと難しいため現在のところ実用化されていない。一方、視覚に関しては、3次元的な空間を提示し、臨場感を実現するために、立体画像提示装置が有効である。立体画像提示装置には、頭部に装着する HMD(Head Mounted Display)[25][26][27]や液晶を利用した立体ディスプレイ、立体視メガネなどがある[28]。聴覚に関しては、これも3次元的な空間に広がる音響を実現するために立体音響装置が開発されている[29][30]。一方、触覚に関しては、いわゆる力感覚と接触や圧覚などを感じる狭い意味での触覚とに分けられる。力感覚の提示は、従来から対象型や力逆送型、力帰還型といったいくつかの方法が研究されている[31]。一方、触覚についても、対象物体の形状に対応して多数のピンの長さを変化させることでその形状を表現する提示装置[32][33]や、人間の皮膚のところに小型の振動子をつけて振動刺激によって触覚を伝える装置、空気圧によって指先に圧覚を生じさせる装置などがある[34]。また、この他にも人間の平衡感覚に提示するモーションベースなどさまざまな装置が開発されている。

計測サブシステム

人間の運動には、頭の運動や手の運動、指の運動、体全体の体幹運動、あるいは目の運動である眼球運動などがあり、仮想現実感においては、これらを実時間で計測する必要がある。計測サブシステムは、

これらの運動を物理的な原理を利用したセンサを用いてリアルタイムに計測する。代表的なものは、人体各部の3次元的位置を計測するポヒマスセンサである[35]。ポヒマスセンサは、米国ポヒマス社により開発されたセンサで磁気を利用した計測方法を採用している。ポヒマスセンサはXYZの3方向にコイルが巻いてある交流磁界発生装置である磁気ソースと、同じように3方向にコイルが巻いてあるセンサからなる。ソースから発生した磁界をセンサで測定することにより、センサの位置および方向を計測することができる。3次元位置を測定するには、この他に超音波や光などを利用する方法もある。一方、人間の運動で非常に重要な指の運動の計測には、データグローブを用いる[36][37][38]。データグローブは、各指の曲がり方を手袋に取り付けたオプティカルファイバを利用して計測する。オプティカルファイバは指に沿った形で配置されており、指が曲がることによってオプティカルファイバが屈曲すると、その中を通る光の量に変化して、指の屈曲量を検知するようになっている。データグローブにはこの他に歪み素子などを用いる方法もある。仮想現実感においては、ポヒマスセンサやデータグローブのほかに眼球運動を計測するアイカメラ[39][40]や体幹や四肢の運動を計測するデータスーツ[41]などがある。

シミュレーションサブシステム

前述の表示サブシステムと計測サブシステムは仮想現実感環境における入出力部分であったが、シミュレーションサブシステムは仮想空間と実空間を対応づける計算を行う部分である[23]。たとえば、実空間で手を動かしているのに仮想空間内では手が動いていないといったことがあると人間は仮想現実感環境の中に没入することはできない。このように、仮想空間と実空間の対応付けを行うことによって初めて人間はあたかも仮想現実感環境に入っているように感じることができる。このサブシステムは、主に実空間の物理的現象を仮想空間内に模擬するシミュレーションとそれを仮想空間内に構築する3次元CG(Computer Graphics)からなる。これらの技術を用いることによって、仮想空間内に実空間のモデルを作成し、それを実空間に対応させて制御し、さらにその状態を提示することができるようになる。

2.3.3 ネットワーク技術

近年、コンピュータネットワークはインターネットの普及に伴い急速に発展している。コンピュータネットワーク技術は、通信回線、通信回線とのインタフェース、情報の伝達方式、誤り制御、伝送制御手順、通信制御ソフトウェアなどの種々の技術により支えられている[42]が、ここでは、インターネットを中心としたソフトウェア技術について述べる。

インターネットとは、TCP/IP(Transmission Control Protocol / Internet Protocol)のプロトコルによって接続された多数の広域ネットワークで、もとは米国内のARPANETから始まり、現在ではNSFNET、NYSERnetのほか世界中にある多数のネットワークの複合体で構成され、全体があたかも単一のネットワークのように協調して動作する「ネットワークのネットワーク」である[43]。インターネットには、電子メール、ネットニュース、ファイル転送、遠隔ログイン、WWW(World Wide Web)など各種のサービスがあり世界中で利用されている[44]。

電子メールは、SMTP(Simple Mail Transfer Protocol)と呼ばれるプロトコルを用いて、文字情報を相互に転送するシステムであり、手紙のように使用できることからこのような呼び名がついている[45][46][47]。電子メールは、そのシステムを使用する各個人がメールアドレスと呼ばれる利用者を特定

するための住所のようなものを宛先として使用し、そのメールアドレスを頼りにして相手先にメッセージを転送する。さらに、インターネットでは電子メールのように個対個の情報伝達手段だけではなく、ネットニュースと呼ばれる不特定他者に向けて発信する手段もあり、一種の掲示板として広く活用されている。

一方、近年、話題となっているインターネットの代名詞ともいえる技術に WWW がある[44]。WWW は、音声、画像、テキストなどのあらゆる情報を結合して统一的にアクセスする手段を与えるとともに、情報の糸（リンク）を次々とたどりながらインターネット上に提供されている情報の探索を可能にするハイパーテキストシステムである。WWW は、図 2-16 に示すように WWW サーバと呼ばれる情報を提供するコンピュータとクライアントと呼ばれる情報を提示するコンピュータが HTTP(HyperText Transfer Protocol)に基づいて相互に通信することによって動作する。WWW サーバコンピュータでは、HTTP デモンと呼ばれるソフトウェアがクライアントからの要求に応じて情報を送信する。一方、クライアントでは WWW ブラウザと呼ばれるソフトウェアによってサーバから送られてきた情報を利用者に提示する。これらの情報は、基本的に HTML(HyperText Markup Language)とよばれる言語により記述されている[48][49]。この他にも音声や画像からソフトウェアまでを送信できる様々な言語が利用できる。

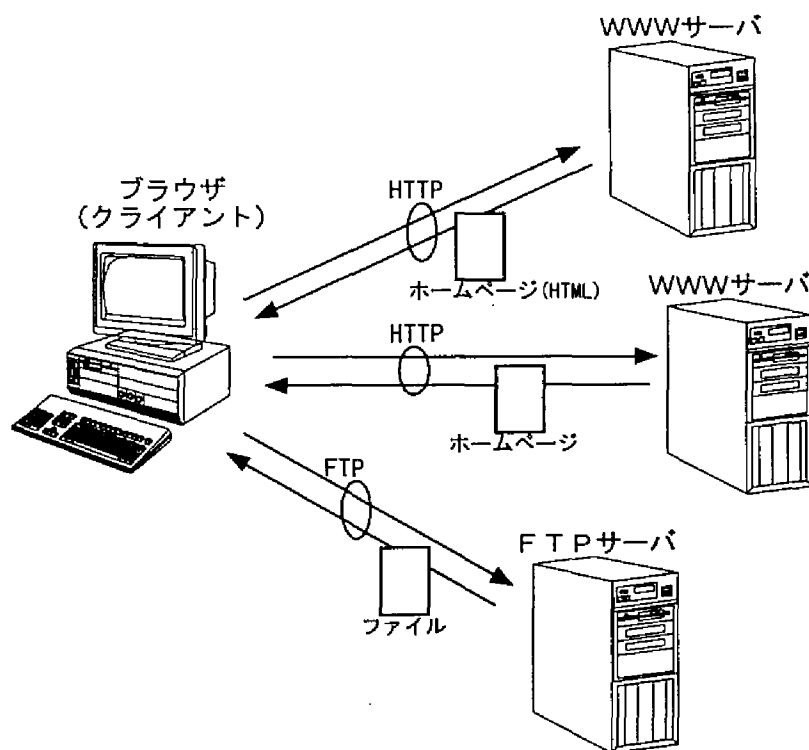


図 2-16 WWW サーバとクライアント間の通信

2.3.4 人間情報行動計測技術

人間情報行動計測技術は、VR 技術はもとより相互適応型インタフェースの基礎技術となるものである。ここでは、人間の運動のみならず、内面状態を推定するため図 2-17 のように生理指標や視覚系情報、発話、表情など、あらゆる指標計測を対象とする。生理指標では、脳波はもちろん、特に、筋電位、皮膚電位、呼吸、心拍、血圧など自律神経系に関連する指標を測定する[50][51]。視覚系指標では、視点、

瞳孔径などが計測対象となる[52][53]。また、発話も人間の認知情報処理の中で注目点を表すものとして有効である[54]。表情や体表温度分布は、内面状態の中でもよく感情を表すといわれている。人間の内面状態を推定するためにあらゆる指標を計測するが、人間が対象なだけに個人差などの不確定要素が多く、一般にその技術は一部しか確立していない。

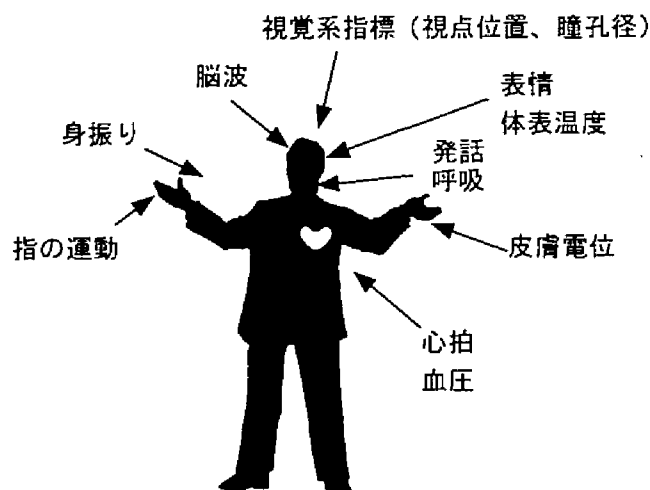


図 2-17 人間情報行動計測における計測指標

2.3.5 各種のコンピュータ要素技術によるヒューマンインタフェースへのアプローチ

ここでは、前述した各種の要素技術について、ヒューマンインタフェースへ適用する際のアプローチの方法についてまとめる。表 2-4 に各種要素技術とヒューマンインタフェースへ適用する場合のアプローチを示す。

表 2-4 各種要素技術とヒューマンインタフェースへの適用

要素技術	ヒューマンインタフェースへの適用
A I 技術	知識情報処理により、人間の知的作業を支援する
V R 技術	臨場感のある仮想環境により、直感的理解と直接操作感を実現する
ネットワーク技術	機械を介した人間同士のコミュニケーションにおいて、分散化を実現する
人間情報行動計測技術	相互適応型インタフェース実現のための基礎技術となる

ヒューマンインタフェースを設計する際には、その設計問題に対して前節の認知工学を適用し、問題解決のために最適な要素技術を選択することで、より高次の人間－機械の交流を図る。

2.4 本論文研究の着眼点と研究の範囲

本研究では、人間に関する科学や知見である認知工学をヒューマンインタフェース設計に適用し、人間と機械の最適な交流形態を実現することを目的とする。具体的には、人間－機械システムの例として原子力プラントを対象としたシミュレーションプログラム生成と宇宙用原子炉の概念設計を取り上げ、その最適なヒューマンインタフェースを設計するため、それらの作業における問題点を認知工学の立場

から検討し、問題解決のための最適なコンピュータ要素技術を選択して、実際にインタフェースを構築する。まず、対象とする作業課題に対して、表 2-2 に示した各種の認知工学モデルから適合する概念を選択して、人間の作業を分析し問題点を抽出する。そして、それらの問題点を解決するために、表 2-4 に示した各種のコンピュータ技術を用いる。以下では、それぞれの課題について具体的に述べる。

原子炉プラントのシミュレーションプログラム生成は、モジュールと呼ばれるプログラム部品を統合することによって解析の対象とする原子炉プラントのシミュレーションプログラムを生成するが、この際、シミュレーションプログラム生成自身は自動的に行われるものの、使用モジュールの選択、引数の結線、シミュレーション実行用入力データの作成などの煩雑な作業が発生する。そのため、モジュールの結合、モジュール間での入出力引数の結線、結線のチェック、およびシミュレーション実行の際の入力データ生成に関して、それらの作業における問題を表 2-2 に示した各種のモデルで分析し、問題解決のために主に AI 技術を用いてヒューマンインタフェースを構築する。また、宇宙用原子炉の概念設計では、未だ存在しない宇宙用原子炉の構造や機能構成の検討、シミュレーションによる機能の確認、各種の専門家による討論などの作業が必要である。シミュレーションプログラム生成の場合と同様に、これらの作業を表 2-2 に示した各種のモデルで分析し、立体モデルやその機能の提示、シミュレーション実行支援を目的として、VR 技術とネットワーク技術の両面からインタフェースを構築する。さらに、より高度なヒューマンインタフェースである相互適応型インタフェースに着目し、その実現に向けて研究を進める。具体的には、その最も重要かつ実現困難な要素技術である人間情報行動計測技術の確立のために、被験者による簡単なタスクを用いた基礎実験を行い、生理指標、発話報告、視点位置、瞬目などの計測データから、タスク実行中の被験者の負荷状態や認知過程などの内面状態の推定方法を検討する。

2.5 まとめ

以上、近年の高度情報処理社会での人と機械の関係が抱える諸問題について述べ、人間-機械の最適な交流形態を実現するためのヒューマンインタフェース技術の高度化について展望した。さらに高度なヒューマンインタフェースとして相互適応型インタフェースの構成を提案し、その実現のための基礎技術を概説した。ヒューマンインタフェース技術の高度化のためには、コンピュータ技術はもとより、人間の認知活動に即した交流形態を実現する必要がある。

本章では、最初に、人間-機械の交流における人間の認知活動に関する知見である認知工学を概観し、ヒューマンインタフェース構築への適用について展望した。認知工学には各種のモデルや概念があるが、ヒューマンインタフェース設計の問題について、すべての場合に適用できるモデルはなく、その問題に合わせて適切なモデルを選択し、設計を進めていくことが重要である。

次に、これらの認知工学に基づきヒューマンインタフェースを構築する際の各種コンピュータ要素技術について述べ、その特徴と適用方法についてまとめた。ヒューマンインタフェース技術の高度化のためには、コンピュータ技術のなかでも AI 技術、VR 技術、ネットワーク技術が重要である。一方、人間情報行動計測技術も相互適応型インタフェース実現のためには欠かせない重要な基礎技術である。

そして最後に、本論文研究の着眼点として、ヒューマンインタフェース設計法の高度化を目的として、認知工学に基づく各種のコンピュータ技術の効果的な適用について述べた。具体的な研究の対象としては、原子炉プラントを対象としたシミュレーションプログラム生成、および宇宙用原子炉の概念設計を

取り上げた。シミュレーションプログラム生成では、モジュールの結合、モジュール間での入出力引数の結線、結線のチェック、およびシミュレーション実行の際の入力データ生成に関して主に AI 技術を用いてヒューマンインタフェースを構築する。また、宇宙用原子炉の概念設計では、立体モデルやその機能の提示、シミュレーション実行に関して、主に VR 技術とネットワーク技術の両面からヒューマンインタフェースを構築する。さらに、より高度なヒューマンインタフェースである相互適応型インタフェースに着目し、その要素技術である人間情報行動計測技術の確立のために、被験者による基礎実験を行い、その実現可能性を検討する。

以下、次章からは、3 章でモジュール統合型シミュレーションシステムにおけるヒューマンインタフェースの構築、4 章で宇宙用原子炉の概念設計支援システムにおけるヒューマンインタフェースの構築、5 章で、ヒューマンインタフェースにおける人間のオンライン認知情報処理特性に関する基礎実験研究について述べる。そして、最後に 6 章の結論で本研究を総括する。

2 章 参考文献

- [1] D.A.Norman: "Cognitive Engineering", Chapter 3 in D.A.Norman and S.W.Draper (Eds.) "User Centered System Design", Lawrence Erlbaum Associates, 1986.
- [2] 認知心理学講座, 1-4, 東大出版社, 1984.
- [3] 佐伯: 「認知科学の方法」, 認知科学選書 10, 東大出版社, 1986.
- [4] 西田, 佐伯: 「ヒューマンコンピュータ交流技術」, オーム社, 1991.
- [5] J.J.Gibson: "The Ecological Approach to Visual Perception", Houghton Mifflin Company, 1979.
- [6] H.A.Simon: "The Science of Artificial", Cambridge, MA, M.I.T. Press, 1969.
- [7] J.Rasmussen: "Information Processing and Human-Machine Interaction", Elsevier Science Publishing Company, Inc., New York, 1986.
- [8] S.K.Card, T.P.Morrان and A.Newell: "The Psychology of Human Computer Interaction", Lawrence Elbaum Associates, 1983.
- [9] 林善男: 「ヒューマンエラー」, Human with Technology, Vol.1, No.2, 1996, pp.72-79.
- [10] D.A.Norman: "Some Observations on Mental Models", Chapter 1 in D.Gentner and A.L.Gentner (Eds.) "Mental Models", Lawrence Elbaum Associates, 1983.
- [11] K.D.Forbas: "Qualitative Reasoning about Space and motion", Chapter 4 in D.Gentner and A.L.Gentner (Eds.) "Mental Models", Lawrence Elbaum Associates, 1983.
- [12] J.Rasmussen: "Skills, Rules, Knowledge: signals, signs and symbols and other distinctions in human performance models", IEEE Trans. on SMC, SMC-13, 3, 1983, pp.257-267.
- [13] J.Rasmussen: "Information Processing and Human Computer Interaction - An Approach to Cognitive Engineering -", North-Holland, 1986.
- [14] M.Lampert: "Knowing, doing and teaching multiplication", Cognition and Instruction. 3, 1986, pp.305-342.
- [15] 佐伯,大村,藤岡,汐見: 「すぐれた授業とは何か ー授業の認知工学ー」, 東大出版社, 1989.
- [16] 佐伯: 「インタフェースと認知工学」, 情報処理学会誌, Vol.30, No.1, 1989, pp.2-14.
- [17] Ford: "How machines think", John Wiley & Sons, Ltd., 1987.
- [18] N.J.Nilsson: "Problem-Solving Methods in Artificial Intelligence", McGRAW-HILL BOOK Co., Inc., 1971.
- [19] D.Schutzer: "Artificial Intelligence - An Application-oriented Approach -", Van Nostrand Reinhold Company Inc., 1987.
- [20] 小林: 「知識システム技術の現状と将来」, 計測と制御, Vol.27, No.10, 1989, pp.859-868.
- [21] M.W.Krueger: "Artificial Reality", Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1983.
- [22] M.W.Krueger: "Artificial Reality II", Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1991.
- [23] 舘: 「人工現実感」, 日刊工業新聞社, 1992.
- [24] 松永: 「五感のおはなし」, 日本規格協会, 1989.
- [25] I.Sutherland: "A Head-Mounted Three-Dimensional Display", FJCC AFIPS 33-1, 1968, pp.757-764.

- [26] S.S.Fisher et al: "Virtual Environment Display System", ACM Workshop on Interactive 3D Graphics, 1986, pp.77-87.
- [27] 廣瀬ほか: 「人工現実感を利用した三次元空間内作業用マンマシンインタフェース」, 第4回ヒューマンインタフェースシンポジウム論文集, 1988.
- [28] StereoGraphics Corporation: "CrystalEyes Stereoscopic System User's Manual", StereoGraphics Corporation, 1992.
- [29] E.M.Wenzel & S.H.Foster: "Realtime Digital Synthesis of Virtual Acoustic Environments", Computer Graphics, 24, No.2, 1990, pp.139-142.
- [30] T.A.Furness: "Experiences in Virtual Space", Human-Machine Interfaces for Teleoperators & Virtual Environments, 1990.
- [31] H.Iwata: "Artificial Reality with Force-Feedback Development of Desktop Virtual Space with Compact Master Manipulator", Computer Graphics, Vol.24, No.4, ACM SIGGRAPH, 1990.
- [32] 山中,岡田,兼吉,井関: 「触覚ペンディスプレイ付きポインティングデバイスの提案」, 第12回ヒューマンインタフェースシンポジウム論文集, 1996.
- [33] 森ほか: 「触覚における仮想現実感を利用した盲人用触覚ディスプレイの研究」, 第19回感覚代行シンポジウム発表論文集, 1993.
- [34] 福井ほか: 「触覚感覚を伴う形状操作手法」, 第5回ヒューマンインタフェースシンポジウム論文集, 1990.
- [35] A Kaiser Aerospace & Electronics Company: "3SPACE USER'S MANUAL", A Kaiser Aerospace & Electronics Company, 1992.
- [36] T.G.Zimmerman et al: "A Hand Gesture Interface Device", Proceedings of CHI+GI'87, 1987, pp.189-192.
- [37] VPL Research Inc.: "DATAGLOVE MODEL 2 Operation Manual", VPL Research Inc., 1989.
- [38] VPL Research Inc.: "DATAGLOVE TEST & CALIBRATION SOFTWARE for the Apple Macintosh Operation Manual", VPL Research Inc., 1989.
- [39] ナック: 「アイマークレコーダ モデルV 取扱説明書」, ナック, 1986.
- [40] ナック: 「EMR-V データアウトプットユニット V-99B 取扱説明書」, ナック, 1986.
- [41] VPL Research Inc.: "DATASUITES Operation Manual", VPL Research Inc., 1992.
- [42] 伊藤: 「コンピュータネットワークの基礎技術」, オーム社, 1988.
- [43] M.T.Rose: "The Simple Book: An Introduction to Management of TCP/IP-based Internets", Prentice-Hall Inc., 1992.
- [44] 村上: 「インターネット」, 岩波書店, 1994.
- [45] J.B.Postel: "Simple Mail Transfer Protocol", Request for Comments 821, DDN Network Information Center, SRI International, 1982.
- [46] C.Partridge: "Mail Routing and the Domain System", Request for Comments 974, DDN Network Information Center, SRI International, 1986.
- [47] D.H.Crocker: "Standard for the Format of ARPA Internet Text Message", Request for Comments 822, DDN Network Information Center, SRI International, 1982.
- [48] Hypertext Transfer Protocol: <http://www.w3.org/hypertext/WWW/Protocols/Overview.html>,

1996.

- [49] D.Raggett: "Document Type Definition for the HyperText Markup Language (HTML DTD)", W3 organization, 1995.
- [50] J.L.Andressi, 伊藤訳: 「心理生理学」, ナカニシヤ書店, 1985.
- [51] J.Hassett, 平井訳: 「精神生理学入門」, 東京大学出版会, 1987.
- [52] K.T.Spoehr, S.T.Lehmkuhle, 芋阪訳: 「視覚の情報処理」, 第9章, サイエンス社, 1986.
- [53] 小野崎, 篠田, 丸尾: 「眼球運動の神経学」, 第1章, 医学書店, 1986.
- [54] K.A.Ericsson, H.A.Simon: "Protocol Analysis", The M.I.T. Press, 1984, pp.263.

3章 モジュール統合型シミュレーションシステムにおけるプログラム開発 実行支援インタフェースに関する研究

3.1 モジュール統合型シミュレーションシステムの構成とヒューマンインタフェース構築のアプローチ

原子力開発では、従来よりプラントの設計、解析、安全評価、監視、診断、運転管理等にコンピュータが多用され、コンピュータなくして原子力開発は存立しえないといわれている。また最近では、在来炉の軽水炉が定着して、さらに高速炉、超安全炉、高転換炉、高温ガス炉などの次世代炉の設計研究が盛んであり、原子力においてはソフトウェア技術開発の占める比重はますます大きくなるものと思われる。しかしながら、プログラム開発や技術計算に関わるソフトウェア作業は人力に依存するところが大きく、ソフトウェアの生産性、信頼性の向上を図るには、ソフトウェア資源の再利用性の向上や、プログラムの開発要員の低減と開発期間の短縮、開発時のプログラムミスや計算時の入力エラー低減、知識ベース化による設計解析作業の効率化など、主としてソフトウェア作業に関わる種々の人的要因の改善を図ることも重要な課題と考えられる。

本研究では、原子力プラントの設計計算や安全評価に多用されるコンピュータによるダイナミックシミュレーションに関わるソフトウェアの生産性向上を目的として、原子力システムの特徴である大規模で複雑なシミュレーションプログラムの開発効率を向上させ、かつ多様な目的のシミュレーションをより柔軟に行うための解析支援環境として、モジュール統合型シミュレーションシステム (Module-based Simulation System; MSS) を開発した。MSS は、モジュールと呼ばれるプログラム部品を結合することによりシミュレーションプログラムを生成するシステムであり、本研究では特に、前節で述べた認知工学的手法を用いて MSS に関わる作業を分析し、問題点を明らかにした。さらに、その問題を解決するために各種のコンピュータ要素技術を用いてヒューマンインタフェースを構築した。以下、本節では、この MSS で用いている基本的方法とソフトウェアシステムの構成を概説した後、そのシミュレーションプログラム開発、およびシミュレーション実行支援のためのヒューマンインタフェース構築のアプローチについて述べる。

3.1.1 モジュール統合型シミュレーションシステムの基本的方法と構成

原子力プラントは、一般に原子炉形式、熱輸送形式、エネルギー変換形式、制御・安全保護形式の組合せにより、多様なプラントの構成概念が考えられる。そして、プラントのダイナミックシミュレーションを行うシステムモデルは、プラントを構成するコンポーネントや関連する物理現象についての数学モデル（基本モデル）を組み合わせて合成され、これらの基本モデルは、異なったプラント構成でも共通に用いられることが多い。そこで、このような基本モデルを再利用性の高いサブプログラム（モジュール）として作成して蓄積し、再利用技術の向上を図れば、ダイナミックシミュレーションのソフトウェア生産性の向上が期待できる。

MSS では、このようなモジュールを一定の形式に従ってサブプログラム化し、ライブラリ化（モジュールライブラリ）を図ることを考えた。また、同時にモジュール利用情報をデータベース（モジュールデータベース）化してライブラリ中のモジュール利用の便宜を高めることを考えた。

次いで、モジュールデータベースから選択したモジュール群を合成してシミュレーション用プログラ

ムを作成する作業を容易に行うために、ユーザがコンピュータ画面との対話でシミュレーションプログラムを自動的に生成することができるようにした（プログラム自動生成）。このようなユーザを支援環境の作成に際しては、タスクの流れに沿ってユーザを自然に誘導し、入力ミスをチェックし、ユーザの負担を軽減するようなヒューマンインタフェースを構築した。

以上、MSS は大規模プログラム開発における人的要因として、プログラム資源の再利用性の向上、ドキュメンテーション管理の容易さ、プログラム作成作業、デバッグ作業、端末作業の軽減を図るため、従来人間が行っていたタスクを大幅にコンピュータに代行させようとするものである。すなわち、①モジュールライブラリとモジュールデータベース、②プログラム自動合成、③ヒューマンインタフェース、④知識ベース化、を基本として構成されたソフトウェアシステムである。そのソフトウェアシステムの構成を図 3-1 に示す。図中の右側はコンピュータ側に近い中核システムで、左側はユーザとの接点となるヒューマンインタフェース部である。

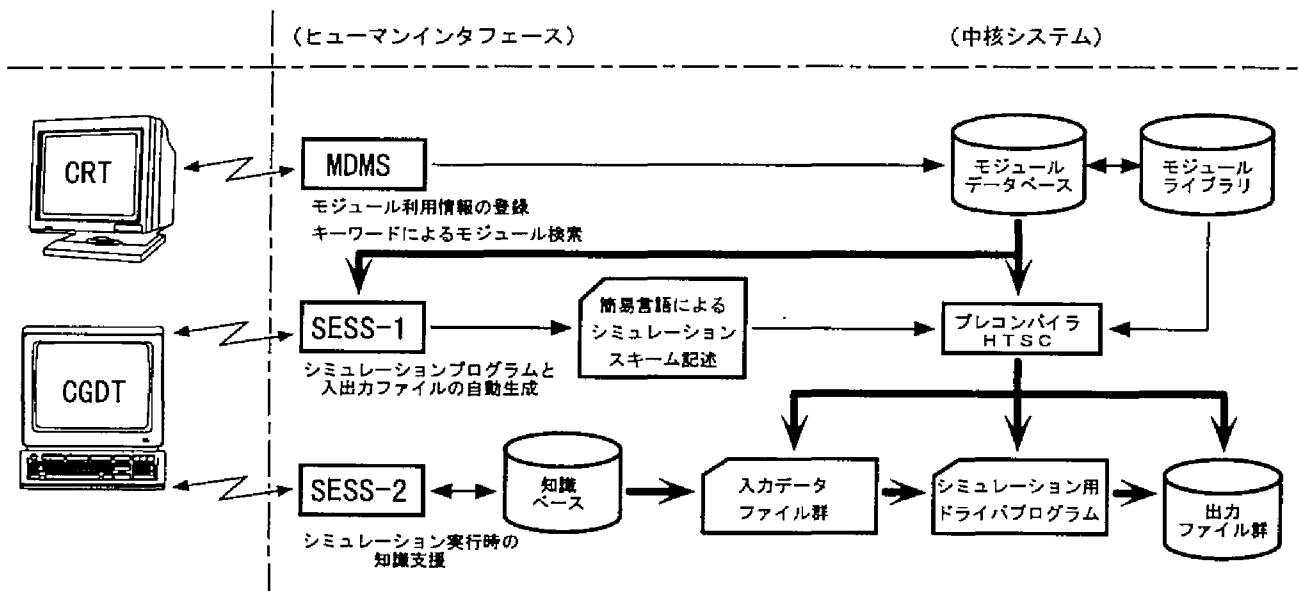


図 3-1 モジュール統合型シミュレーションシステムのソフトウェア構成

MSS の中核システムは、図 3-1 に示すようにモジュールライブラリ、モジュールデータベース、および選択されたモジュール群を自動的に統合するためのプレコンパイラ HTSC で構成される。

一方、ヒューマンインタフェース部は、人間と中核システム部との接点になる部分で、次の 3 つのシステムにより構成を図る。

(1) モジュールデータベース管理システム MDMS :

モジュールライブラリに登録されたモジュールプログラムの利用情報をモジュールデータベースに登録し、また、キーワード検索によりモジュールライブラリから必要なモジュール選択を行う。

(2) プログラム開発支援インタフェース SESS-1 :

モジュールライブラリから選択したモジュール群を統合し、HTSC を自動起動してシミュレーション実行可能なプログラム入出力環境を作成するまでの支援を行う。

(3) シミュレーション実行支援インタフェース SESS-2 :

SESS-1 で作成されたシミュレーションプログラムに対して、そのシミュレーション実行時の知

的支援を行う。

本研究では、上記の3つのインタフェースのうち、特に複雑な作業を必要とする SESS-1 および SESS-2 に着目した。

以下、本節では MSS の中核システムの構成に関連して、MSS の基本的方法と、ソフトウェアシステムを構成するそれぞれのサブシステムについて述べ、最後にヒューマンインタフェース設計上の観点について述べる。

3.1.2 モデル、モジュール、モジュールライブラリとモジュールデータベース

3.1.2.1 モデルの構成

原子力システムのように複雑大規模なシステムの全体的な動的振舞のシミュレーションでは、個々の基本的な物理現象の挙動を表す数学モデル（単位モデル）を組み合わせ（合成あるいは統合）、あるコンポーネント全体の動的挙動を表すモデル（合成モデル）を作成することが多い。単位モデル、合成モデルの別を問わず、このようなモデルでは、形式上は入出力変数の観点からは次のように構造化できる。

すなわち、静的（スタティック）モデルであれば、

$$Y \leftarrow^F X; P \quad (3-1)$$

ただし、 X : 入力変数、 Y : 出力変数

F : 入力を出力に変換するオペレータ

P : オペレータ F の記述中のパラメータとなる部分

また、離散時間表示による動的（ダイナミック）モデルであれば、

$$Y_{k+1} \leftarrow_{t_k, \Delta t}^{F_k} Y_k, X_{k,k+1}; P \quad (3-2)$$

ただし、 t_k : 時間、 Δt : 時間刻み幅

Y_k : 時刻 t_k での状態変数

F_k : 状態を Y_k から Y_{k+1} に遷移させるオペレータ

$X_{k,k+1}$: 外的入力因子

P : F_k の記述中のパラメータ

3.1.2.2 モジュールとモジュール外部仕様

上述のモデルはサブプログラムとして具体化されるが、プログラムの再利用性を高めるプログラミングの方法を考えると、モデルはソフトウェア工学でのモジュール概念に対応する。すなわち、モジュールは他のモジュールと組み合わせて大きなシステムを構成するための要素であり、次の性質を備えている必要がある[1][2]。

- ① 際立った1つの抽象概念に裏付けられること
- ② 外に示すべきものとそうでないものとが分離され、後者に対して外部からアクセスできないこと。ソフトウェア工学でいう「情報隠蔽」にあたる。サブルーチンで用いる変数を、サブルーチン外でも共通に用いるもの(A)と、内部でだけ使用するもの(B)に明確に区別するには、Aのみを引数リストとするプログラム方法が望ましい
- ③ 他のモジュールとの間に一様性を保ち、利用形態により矛盾を生じないこと
- ④ モジュールの使用法がわかり易く、利用に当って誤りを起こしにくく、また誤りも発見し易いこと
- ⑤ 信頼性があり、正当性の確認や検証がし易いこと
- ⑥ 分離コンパイルや他のモジュールとの結合が容易であること

そして、単位モデルから合成モデルを作成することは、モジュールの階層構造化に相当するが、合成されたモジュール自身も、単位モジュールと同じ構造を持たせる必要がある。

このようなモジュールはプログラムの構造として、一般にインタフェースと呼ばれる導入部と、本体と呼ばれる実現部からなるが、「複合/構造化設計」[3]によると、「データ結合」方式によるインタフェースがモジュールの結合度を最も弱くでき、個々のモジュールの独立性が最も高いので、モジュールの再利用性の観点から最も望ましい。MSS では、モジュールのインタフェースとしてデータ結合方式を採用し、モジュール間のデータの授受は共通変数を用いず、引数リストにより行う。

一方、モデル中の具体的な計算手続きはモジュールの本質となる部分であり、サブプログラム中では一連の実行文により表される。ここでは、これをモジュール名が代表するものとする。そして引数リストは数学モデル中の変数の意味や用途により、さらに INPUT、OUTPUT、DATA、CONTROL の4つに分類する。数学モデル(3-1)、(3-2)式でのモデル中の変数と引数リストの分類との対応を表3-1に示す。なお、CONTROL に属する引数には時刻 t を表す TIME、計算時間刻み幅 Δt を表す DELT を予約語とするほかに、モジュールの引数の配列寸法が可変の場合の可変配列寸法を与える変数もこれに入れる。モジュールの CONTROL 変数に DELT、TIME があるか否かで数学モデルが静的か動的の区別ができる。なお、個々のモジュールは FORTRAN77 によりプログラミングするが、インタフェース情報を明確にするため、サブプログラムの先頭にヘッダ部を設けて、上述の引数の4分類や配列サイズ、変数タイプなどのモジュール統合上の必要な情報を記載している。

表 3-1 静的、動的モデルの諸変数とモジュール引数の分類との対応

	静的モデル	動的モデル
Input	X	$Y_k, X_{k, k+1}$
Output	Y	Y_{k+1}
Data	P	P
Control		$t, \Delta t$
配列変数の可変寸法		

3.1.2.3 モジュールライブラリ

原子力プラントのシミュレーションのための基本的な数学モデルのモジュールプログラム化では、既に述べたモジュール外部仕様を守るだけでなく、定常解析モデルと過渡解析モデルを必ず対としてモ

ジュールを作成し、定常計算と過渡計算に整合性を持たせるようにした。

モジュール群の開発では、対象プラント、モデルの精粗をすべて網羅すると多岐にわたるため、ここでは主として液体金属冷却高速増殖炉（LMFBR）のプラント動特性の総合模擬機能の構成を目的として、原子炉から Na/Na および Na/水蒸気熱交換器、さらにタービン系に至るプラントの主要コンポーネントの簡略化動特性モジュールを作成した。

これらのモジュール群の項目を列挙すると、①1点近似核動特性、②崩壊熱動特性、③炉心出力分布計算、④単チャンネル炉心熱流動特性、⑤炉心バイパス流モデル、⑥プレナム内温度ミキシングモデル、⑦上部プレナム熱過度解析モデル、⑧配管モデル、⑨中間熱交換器モデル、⑩ポンプモデル、⑪蒸気発生器モデル、⑫蒸気ラインモデル、⑬タービンシステムモデル、⑭コンデンサモデルなどである。

3.1.2.4 モジュールデータベース

モジュールライブラリに蓄積されたモジュール群をソフトウェア資源として有効に再利用するため、モジュール利用上の必要情報をデータベース化するとともに、利用目的に適したモジュールをライブラリから検索するため、モジュールデータベース管理システム MDMS を作成した。MDMS は、モジュール情報の登録、更新、キーワード検索によるモジュールの選択など、モジュールデータベースを対象とした追加、変更、参照などの機能を実現している。一般に、データベースの操作は文献検索などの際に必要とされ、従来からシミュレーションプログラム開発者にとって慣れ親しんだ操作と考えられるので、このヒューマンインタフェースとしては、ユーザが既に持っているデータベース操作のメンタルモデルが活用できるように、従来型の CRT ベースの対話型操作とした。

モジュールデータベースへの収録情報として、①モジュールの内容を理解するための解説情報、②モジュールを自動的に結合する上で必要な情報、③シミュレーションを実行する上で必要な入力データ作成法や計算結果の管理上必要な情報、の3つの観点から整理し、図 3-2に示すように、モジュール名と引数名に付随する情報に分類してデータベース化している。

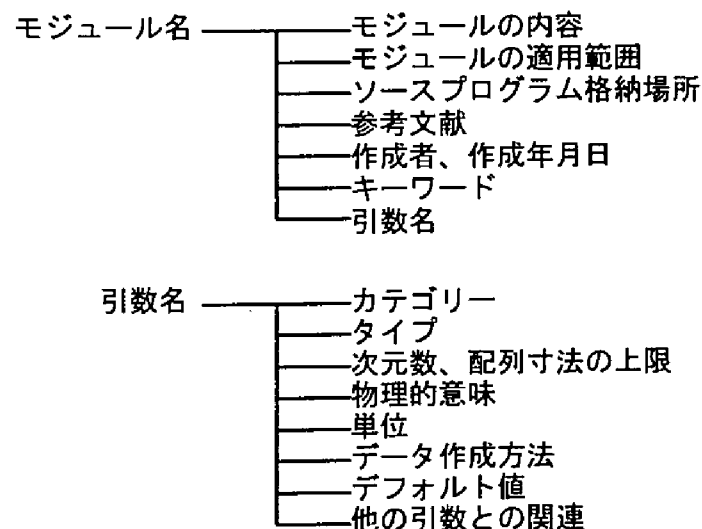


図 3-2 モジュールデータベースでのモジュール名と引数名に付随する情報の分類

一方、キーワードによるモジュール検索を容易にするため、原子力システムの解析で用いられる基本単位としての数学モデルの性格を次の4つのクラスに分類した。

- ① モデルの性格（例えば静的、動的モデル、確率論的モデルなど）
- ② 関連物理現象の工学上の分類（例えば流体力学、伝熱工学、制御など）
- ③ プラントの構成要素（例えば原子炉炉心、パイプ、ポンプなど）
- ④ 応用上適用可能な原子炉型（例えば軽水炉、高速炉など）

そして、各クラスのキーワード分類では、キーワード間の概念上の階層性を考慮してキーワード構造を3層の樹木構造とし、メニュー画面上に予め標準的なキーワードセットを表示するとともに、新たなキーワードの追加も可能な方式としている。図 3-3に上述の②のクラスのキーワード選択画面の表示例を示す。ユーザは個々のシミュレーションの目的に応じ、4つのクラスのいずれの側面からでもモジュールの検索が行え、その後、必要なモジュール群を取捨選択し、次のモジュール自動統合のための中間ファイルが自動的に作成される。

ATM112		DATE 89.12.17 TIME 00.38.12	
* * SYSTEM TREATED * *			
1. FUEL 1.1 FUEL PELLETT 1.2 CLADDING 1.3 OTHERS 2. COOLANT CHANNEL 3. REACTOR CORE 4. PLENUM 5. REACTOR VESSEL 6. PIPING 7. TURBINE 8. VALVE 9. PUMP	10. PRESSURIZER 11. STEAM GENERATOR 12. ENGINEERING SAFETY FACILITY 13. LOOPS 14. INSTRUMENTATION 15. SAFETY CIRCUIT AND LOGIC UNITS 16. ACTUATOR 17. OTHERS	1 1:SEARCH 2:DELETE 3:ADD 4:REPLACE	
NUMBER OTHER ITEMS . ANY ... SPECIAL FEATURES (1) (2) (3) (4) (5)			

図 3-3 プラント構成要素の観点から分類されたキーワード設定・検索用メニュー画面

3.1.3 プログラム自動統合

原子力プラントのシステムシミュレーションでは、定常型（静的）および過渡変化型（動的）双方の問題があり、対象とする問題が数式モデル、変数量の点で一般に複雑で大規模になる。そしてダイナミックシミュレーションでは、初期定常状態の設定後、多種多様な外乱が印加され、その後、時定数の異なる多数の現象が複合するシステムの過渡変化の追跡が要求され、必要な計算時間スパンは、問題によりごく短時間であったり、まだ極めて長時間の解析も要求される。このようなシステムシミュレーションのためのコンピュータプログラムを、モジュールライブラリから選択したモジュール群から組み合わせてコンピュータにより自動的に生成するために、モジュール統合用プレコンパイラ HTSC を作成した。

HTSC はモジュール統合上必要な情報をブロック化した簡潔な表現で記述する簡易言語リストを入力すると、シミュレーション用メインプログラムとシミュレーション実行時に必要な入出力ファイル群を自動生成するものである。以下、HTSC で用いる簡易言語リストを「HDL 記述リスト」と呼ぶこととし、そのブロック構成と記述内容の概略を図 3-4に示す。

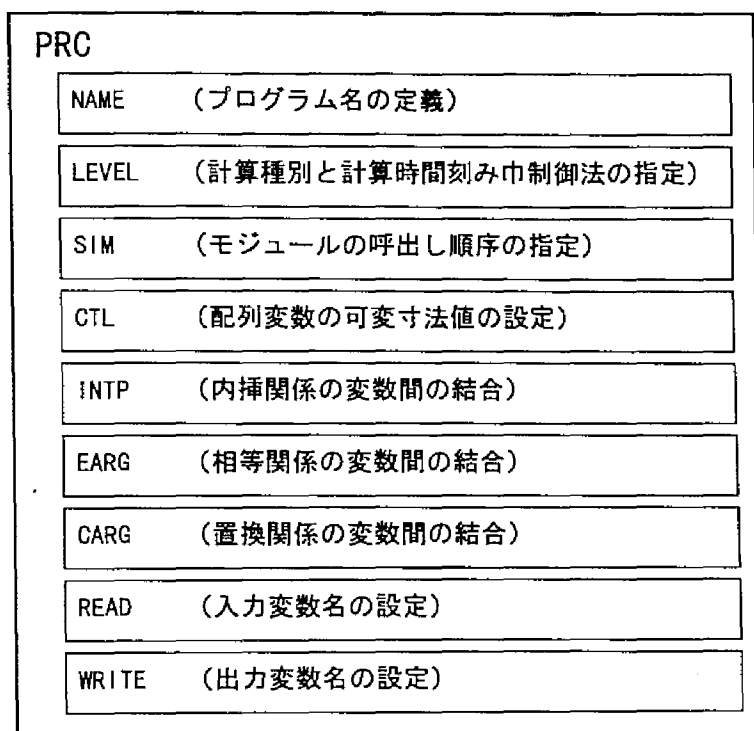


図 3-4 モジュール統合用プレコンパイラ HTSC への簡易言語記述(HDL 記述リスト)のブロック構成

なお、モジュールを統合する際に同一モジュールを重複して使用できるように、図中の SIM ブロックではモジュール名の指定を「旧モジュール名 (実際のモジュール名) / 仮モジュール名」という形式で指定し、INTP、EARG および CARG ブロックにおける引数間の接続の指定 (インタフェーシング) では、引数の指定は「仮モジュール名中の引数名」という形式をとっている。以下、HTSC の機能を列挙する。

- (1) 静的、動的計算ないし初期定常計算から過渡計算に接続する計算を実行するための FORTRAN77 メインプログラムを自動生成する。
- (2) 動的モデルを記述する各モジュールは安定に計算できるための計算時間刻み幅に制約があるので、計算時間刻み幅の大小でモジュール群を複数のレベルに分け、マルチレベルの計算時間刻み幅制御ができるプログラムを生成できるようにする。すなわち、より細かい時間刻み幅を要するモジュール A の計算時に、より大きな時間刻み幅で計算できるモジュール B の一部の計算結果を入力条件として必要な場合には、1 ステップのモジュール B の計算結果から、モジュール A の細かな時間刻みに相当する線形内挿値を自動的に求めて、それをモジュール A の計算に必要な入力値として与えるようにする。
- (3) 長時間計算を要する場合の便宜のためにリスタート計算の機能を設ける。
- (4) 計算実行時に必要な入力データの変数名を書き出した入力用ファイルと、それらの入力変数名を説明するガイドファイルを自動生成する。
- (5) 定常計算結果と過渡計算結果に分けて、出力用データファイルとその出力変数名を説明するガイドファイルを自動生成する。なお、過渡計算結果の図形処理には、日本原子力研究所が開発した汎用図形処理パッケージ SPLPACK^[4]を用いるので、過渡計算結果出力ファイルへの出力形式は SPLPACK が指定する SPL 形式による出力編集機能を設けている。

以上の HTSC とは別に、モジュールの階層化に相当するものとして、幾つかのモジュールを組み合わせて合成モジュールを作成するためのユーティリティ SPGEN を作成している。SPGEN は、幾つかのモジュール組み合わせてプラント構造や概念上からひとまとめにした新しいモジュールを、既に述べたモジュールの外部仕様にあわせて作成するもので、次の事項を考慮できる。

- ① もとのモジュールの引数を不必要に外にさらさないための隠蔽
- ② HTSC による統合規約に合わせるために引数の調整や新規のモジュール引数の設定
- ③ 反復、条件分岐などの複雑な計算ロジックの記述を含めるモジュールの合成

なお、SPGEN への入力、以上の事項を可能とするため、SPGEN 特有の言語記述 (SPL 記述言語) と FORTRAN77 文の混在する形式をとっている。

この SPGEN の使用によって、HTSC により統合されるモジュールの個数や変数の数を減らしておけば、HDL 記述リストを作成する労力が軽減される。

3.1.4 MSS におけるヒューマンインタフェース設計上の着眼点

本項では、MSS における人間の作業とその問題点に着目し、2.2 節で述べた認知工学の各種の概念やモデルにより問題点の分析と解決方法を示し、さらに 2.3 節で概説したコンピュータ技術を用いて、ヒューマンインタフェースを設計する際の着眼点について述べる。

MSS を用いた原子炉プラントのシミュレーションは、大別して以下の工程で行う。

- シミュレーションプログラムの開発
- シミュレーションの実行

MSS では、これら 2 つの作業についてヒューマンインタフェースを構築した。以下では、このそれぞれについて、必要な作業とその問題点を明らかにし、認知工学を用いた問題の分析と解決方法、構築に用いたコンピュータ技術について述べる。

3.1.4.1 プログラム開発支援インタフェース構築のアプローチ

MSS は、3.1.1 項で述べたようにモジュールと呼ばれるプログラム部品を結合することによってシミュレーションプログラムを自動生成するものであるが、HTSC によるプログラムの自動生成のためには生成情報である HDL 記述リストが必要である。すなわち、MSS を用いてシミュレーションプログラムを開発する作業は、主に HDL 記述リストを作成することである。HDL 記述リスト作成の作業は、

- (1) 使用モジュールの選択と順序付け
- (2) 入出力引数の結線作業
- (3) 出力変数の設定とグラフ化の指定

の 3 段階で行われる。これらの各段階の作業を支援し、HDL 記述リストの作成やシミュレーション実行環境の整備を目的として、プログラム開発支援インタフェース SESS-1 を構築した。表 3-2 に SESS-1 構築のアプローチを示す。

表 3-2 プログラム開発支援インタフェース SESS-1 構築のアプローチ

作業	問題点	認知工学の概念	コンピュータ技術
HDL 記述リストの作成	大規模なプログラムでは記述作業が煩雑になる	・人間と機械の役割分担 ・メンタルモデル	CRT ベースのインタフェース
入出力引数の結線作業	結線状況が把握しにくい	・実行の淵と評価の淵 ・メンタルモデル	カラーグラフィックベースのインタフェース

SESS-1 で着目した作業は、前述の HDL 記述リスト作成、および入出力引数の結線である。入出力引数の結線作業は HDL 記述リストの作成に含まれるが、プログラムの規模が大きくなりモジュールが多数必要な場合には、結合する引数の数が膨大となり結線状況がわかりにくくなるため、HDL 記述リスト作成の際のボトルネックとなる。ここでは、その問題を解決するため、特に入出力引数の結線作業に着目した支援インタフェースも併せて構築した。

まず、HDL 記述リストの作成作業では、シミュレーションの対象となる原子炉プラントの規模が大きくなると、HDL 記述リストが数百行にも及ぶ長大なものとなり、これをユーザが直接キーボードから入力するのは非常に困難となる。また、記述する際には、使用するモジュールに関する情報やその引数に関する情報が必要であり、それらを参照しながら HDL 記述リストを作成することになるため、記述作業が非常に煩雑になる。HDL 記述リストの作成は、本来ユーザが望んでいるシミュレーションプログラムの開発という目的には直接関係なく、ユーザにとって本質的な作業ではない。そこで、人間と機械の役割分担を明確にし、機械的な作業についてはコンピュータが自動的に行うことでユーザがより本質的な作業に集中できるようにする。具体的には、コンピュータのガイダンスに従って対話作業を行うことで HDL 記述リストを自動生成する。また、その際のインタフェースとしては、ユーザが MDMS の操作で獲得しているメンタルモデルをそのまま適用して特別な操作説明がなくても使用できるように CRT ベースのインタフェースである CRTS を考えた。

一方、モジュール入出力引数の結線については、プログラムの規模が大きくなると結線数が膨大なものとなる。上述の CRTS では、結線作業も CRT ベースで行うが、その作業は、2.2.2.1 で述べた「実行の淵と評価の淵」の概念で考えると、

目的とする結線の想定(意図) → CRTS による結線手順の選択(行動選択) → キータイプ(実行)

のようになる。また、結線状況の把握の際には、

CRT に表示された結線情報(知覚) → 結線の解釈(解釈) → 結線状況の把握(評価)

のようになる。ここでは、これらの各段階でユーザの認知情報処理を軽減するために、カラーグラフィックを用いたヒューマンインタフェース CGKS を考えた。このインタフェースでは、結線状況の提示方法として、「結線」という言葉からユーザがメンタルモデルとして持ちやすい「線」をカラーグラフィックにより表示している。また、修正操作も結線を確認しながら行うことができる。これにより、行動選択や解釈の段階での負荷が大幅に軽減され、結線状況の直観的理解と、確認・修正の直接操作が実現できる。

以上のように、プログラム開発支援インタフェース SESS-1 は、上記のような観点から、HDL 記述リストの作成作業支援 CRTS と結線作業支援 CGKS の2つにより構成される。なお、SESS-1 の詳細については、3.2節で述べる。

3.1.4.2 シミュレーション実行支援インタフェース構築のアプローチ

上記のようにして開発されたシミュレーションプログラムを実行する際には、以下のような作業が必要である。

- (1) プログラムの正当性を確認
- (2) 実行時の入力データの作成

シミュレーション実行支援インタフェース SESS-2 は、シミュレーション実行に関してこれらの作業を支援することを目的として構築した。表 3-3 に SESS-2 構築のアプローチを示す。

表 3-3 シミュレーション実行支援インタフェース SESS-2 構築のアプローチ

作業	問題点	認知工学の概念	コンピュータ技術
プログラムの正当性を確認する	大規模なプログラムでは結線作業に誤りが生じやすい	・ 人間と機械の役割分担 ・ ヒューマンエラーモデル	AI 技術
入力データの作成	物性値など専門的な知識が必要 入力データが膨大となり作業が繁雑	・ 人間と機械の役割分担 ・ ヒューマンエラーモデル	AI 技術

SESS-2 で着目した作業は、プログラムの正当性の確認と入力データの作成である。以下では、この2つの作業を支援するヒューマンインタフェース構築のアプローチについて述べる。

SESS-1 で開発されたシミュレーションプログラムの実行の前には、プログラムの正当性を確認しておく必要がある。これまでの経験から、MSS では、プログラムの誤りは主にモジュール間の引数の結線で生じやすいことがわかっている。これは、CGKS で結線状況が把握しやすくなったものの、プログラムが大きくなると結線量が多くなるため、2.2.2.4 のヒューマンエラーモデルで示すところの、スリップやラプスだけでなくモジュールによる引数の意味の違いや思い込みなどの知識ベース行動でのミスが増えるためと考えられる。シミュレーションを実行したのはいいが、プログラムが間違っている、長時間の計算の後、意味のない結果が得られるだけである。シミュレーション実行の前に、プログラムの正当性を確認するために、引数の意味を調べて、引数結線が正しいかどうかを調べておくことは非常に重要である。この確認作業は、結線の数が多いだけに多大な労力が必要である。そこで、この確認作業をできるだけコンピュータで自動化し、疑わしいと診断された結線だけをユーザが最終的に調べるようにすることで、ユーザの負荷軽減を図る。引数結線が正しいかどうかを調べるためには、モジュール間の結線状況だけでなく、その引数を持つ意味や単位などの知識を総合的に評価する必要があるため、ここでは AI 技術を用いて引数結線の意味論的診断を行う。また、疑わしいと診断された結線については、疑わしい点と関連情報を提示することで、ユーザの確認作業を支援する。

一方、シミュレーションプログラムの正当性が確認されると、シミュレーション実行の段階に入るが、その際には、シミュレーションに必要な入力データを用意しなければならない。入力データは、構造材の物性値や初期条件など多くのデータから構成され、それぞれについて専門的な知識が必要である。また、使用するモジュールの構造によっては同じデータを何度も用意する必要がある。このような煩雑な

作業では、誤りが起こりやすく、プログラムが間違っていた場合と同様に入力データの些細な間違いによってシミュレーション計算が無駄に終わる場合も少なくない。そこで、この段階でも入力データ作成作業をできるだけコンピュータに代行させることによって、ユーザの負荷軽減を図ることを考える。具体的には、前述の AI 技術を用いて、使用するモジュールの情報、生成されたプログラムの情報、シミュレーションの対象となる原子炉の仕様や物性値などを知識ベース化し、その知識からできるだけ自動的に入力データを設定する。自動的に設定できないデータについても過去の来歴や計算などでデータ設定を支援するような交流型 AI を考える。このため、ユーザは自動設定ができなかった入力データについてのみ考慮すればよいので、シミュレーション結果の評価など、シミュレーションの目的である本質的な作業に集中することができる。

以下、次節からは、このような観点で構築したプログラム開発支援インタフェース SESS-1、およびシミュレーション実行支援インタフェース SESS-2 の詳細を述べる。

3.2 プログラム開発支援インタフェース SESS-1

3.2.1 プログラム開発支援インタフェースの構成

前節で述べた HTSC への入力となる簡易言語 HDL 記述リストの作成は、選択したモジュールを統合してシミュレーションプログラムを作成する上で作業の中心となるが、HTSC のみでシミュレーションを試行した経験から次の問題が明らかになった。

- (1) 対象とする問題が大規模になると、そのための事前分析や作成した HDL 記述リスト中のエラーのデバッグが不可避であり、完全な HDL 記述リストにするまで手間がかかる。
- (2) メインプログラムの作成だけではシミュレーションが直ちに実行できず、モジュールライブラリ中のモジュール群や SPLPACK 中の関連サブルーチンなどの結合を含めた翻訳、結合、編集作業が煩わしい。

以上の人間の負担軽減を図り、即座にシミュレーションを実行できる環境を整えるための総合的な支援インタフェース SESS-1 を開発した。図 3-5 に、その全体システムを図示する。

この SESS-1 の主目的は、人間はシミュレーションプログラム生成の本質的側面のみに関与し、ドキュメンテーション、チェック作業や標準化した手順の実行は計算機に任せることで負担軽減を図るものである。すなわち、SESS-1 の開発前まで人間が行っていた作業を分析し、計算機ができる部分を肩代わりさせ、さらに計算機ができない部分については、その作業における人間の認知活動に即したヒューマンインタフェースを構築する。

まず、最初に SESS-1 の機能構成を検討するため、従来まで人間が行っていた作業を分析する。その作業を時間の流れに沿って表すと図 3-6 のようになる。

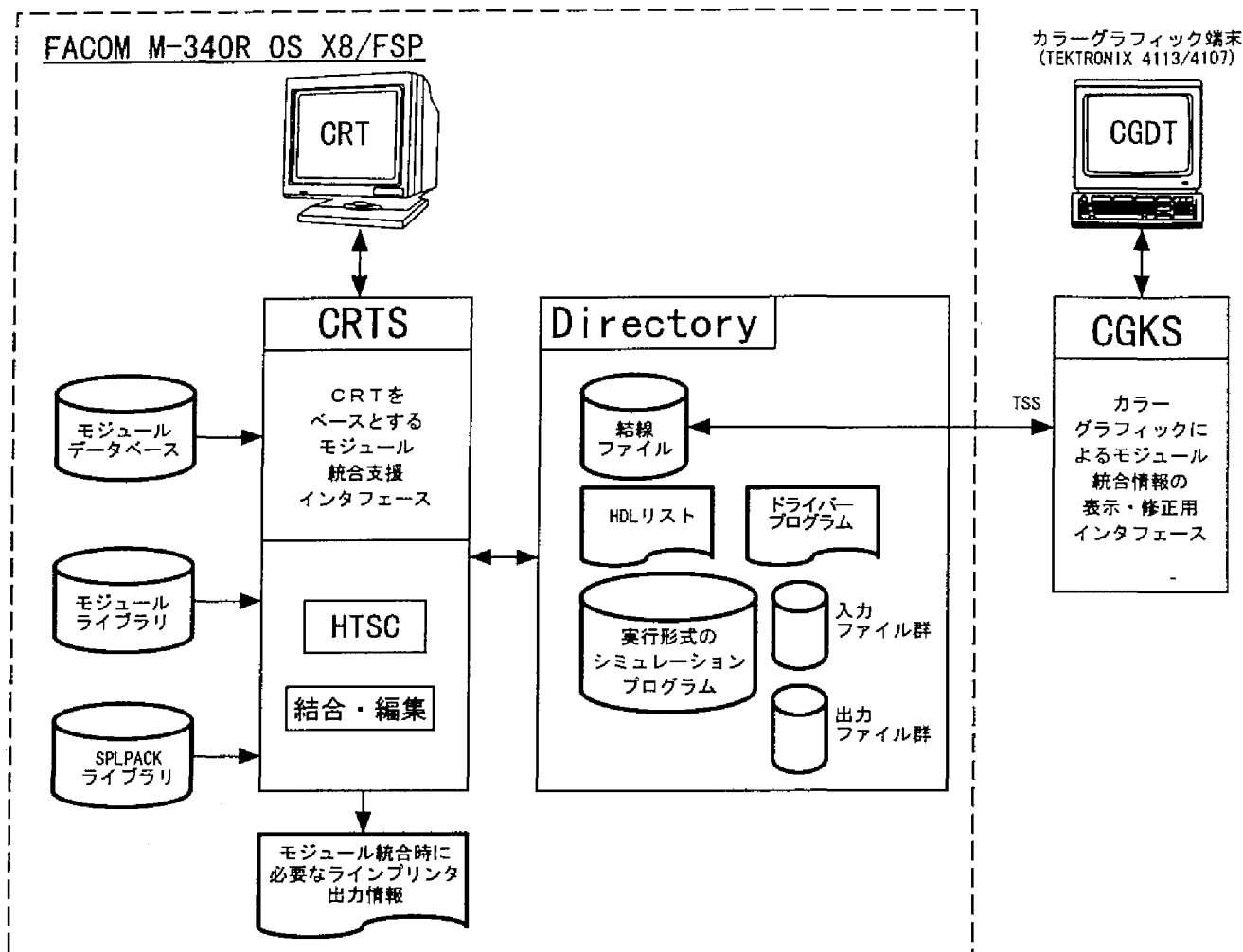


図 3-5 モジュール統合型シミュレーションシステムのプログラム開発支援ヒューマンインタフェース SESS-1 の全体構成

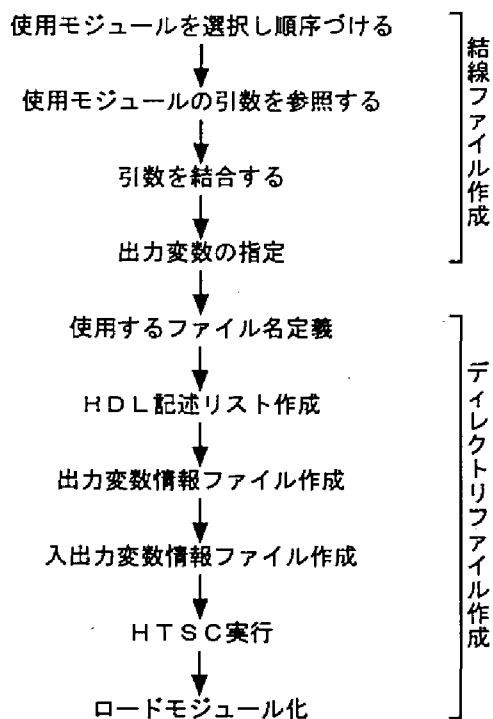


図 3-6 モジュール結合によるプログラム開発の手順

ここで、結線ファイルの作成は、対象とする原子炉の形式や仕様を表すために、シミュレーションプログラム開発における本質的な部分であり、すべての作業を計算機に代行させることはできない。特に、モジュールの結線作業は、引数の数が非常に多くなるために煩雑な作業となる。そのため、結線ファイルの作成については、その作業の各段階において支援機能を実現する。一方、ディレクトリファイルの作成では、ほとんどの作業を計算機で自動化させることができる。このような考え方にに基づき、以下では、SESS-1 の機能構成を述べる。

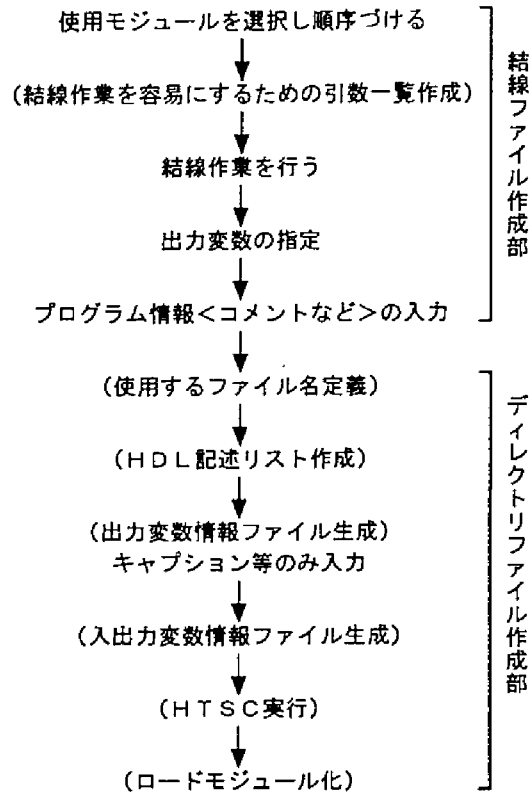
- (1) HDL 記述リストの作成作業を、モジュールの呼出し順序設定とモジュール間の INPUT、OUTPUT 引数間の接続結線（モジュール結線）とに分解し、これをユーザとの対話で行う。
- (2) 一つのシミュレーションプログラム作成に付随して生成される結線ファイル、HDL 記述リスト、メインプログラム、シミュレーションプログラム、入出力ファイルなどの関連ファイルをディレクトリを設けて計算機に一括管理させる。
- (3) 実行用シミュレーションプログラムの作成に必要な翻訳、結合、編集の標準的手順を計算機のバックグラウンド処理に任せる。

上記の機能を実現するため、SESS-1 は CRTS と CGKS の 2 つのサブシステムにより構成する。CRTS は、CRT 上のメニュー画面との対話でモジュール結線、HDL 記述リストの作成、HTSC によるメインプログラム作成、必要なサブルーチンの結合による実行形式プログラム作成など、モジュール統合作業の中心となるインタフェースである。一方、カラーグラフィックディスプレイ端末を用いる CGKS は、カラーグラフィックによる視覚表示でモジュール結線状態の確認や修正を行うもので、CRTS とは結線ファイルを介して結合している。

SESS-1 によるシミュレーションプログラム開発の手順は、図 3-7 のようになり、図中の（ ）内の作業は計算機がバックグラウンドで処理するものであり、ユーザの関与する部分は少なくなっている。以下、モジュール結線の対話作業を中心に CRTS と CGKS の機能を述べ、ついで試行例による SESS-1 の効果の検討結果を述べる。

3.2.2 CRTS による HDL 記述リストの自動生成

CRTS では、ユーザがシミュレーションの意図に沿った思考、判断に専念し、煩雑なチェック作業から解放するため、構文上完全な HDL 記述リストをユーザとの円滑な対話で自然に誘導するとともに、ユーザ入力の正当性を構文的に診断する機能を内蔵させたインタフェースとして設計した。CRTS では、モジュールデータベースより引き出したモジュールの引数情報を作業ファイルとしての結線ファイルに移し、対話形式でユーザが入力する HDL 記述リスト生成に必要な情報をファイルに付加していくことによって、目的の HDL 記述リストを自動生成する。このシステムの起動後のメニュー画面を図 3-8 に示す。



() 内はSESS-1が自動的に行う作業

図 3-7 SESS-1 によるプログラム開発の手順

```

ATM200                                DATE 90.03.15  TIME 23.03.28
*****
*   SIMULATION EXECUTION SUPPORT SYSTEM   *
*           FOR HTSC  KYOTO UNIV.         *
*****

    ** PROCESS SELECTION MENU **
    1. SIMULATION SCHEME INITIAL SETUP
    2. SIMULATION SCHEME DISPLAY/MODIFY
    3. INTERFACING SCHEME INITIAL SETUP
    * 4. OUTPUT SCHEME INITIAL SETUP
    5. PROGRAM INFORMATION SETUP
    6. HDL DESCRIPTION SETUP
    7. KESSEN FILE DELETE

          * FILE NAME LIST *
FBRPRM   FILEN002  HDLTEST  SIMTEST  TESTSS  TRTEMP

*** PLEASE KEY IN FILE NAME ***      FBRPRM
*** PLEASE KEY IN PROCESS NO. ***    2
  
```

図 3-8 CRTS の自動結線の処理を選択するメニュー画面

以下、メニュー画面の流れに沿って進むユーザの作業順序を示す。

- (1) モジュール構成（シミュレーションスキーム）の設定：計算の種別（定常、過渡、定常から過渡への接続計算）の選択、過渡計算における計算時間刻み幅制御の階層数（タイムステッ

レベル) の入力、使用するモジュールの選択および順序の指定を行う。ここで関係するモジュールの引数情報がモジュールデータベースより結線ファイルに移り、また、以下の作業が容易に行えるように引数情報の一覧表がプリンタに出力される。

- (2) モジュール間の引数結合関係（インタフェーススキーム）の設定：意味の違いにより相等、置換、内挿、初期値設定の4種の結線を別作業として扱う。図3-9は置換関係の設定を行うメニュー画面を示す。
- (3) アウトプット変数設定（アウトプットスキーム）：シミュレーション結果から出力したい変数名の指定およびその格納先の出力ファイル名を定義する。
- (4) プログラム情報の設定：プログラム名の定義およびコメントの付加を行う。また、可変配列の寸法値を設定する。

これらの作業が終了すると、目的とする HDL 記述リストに変換することができる。

ATM220		DATE 90.03.15 TIME 23.16.00	
* INTERFACING STRATEGY (REPLACING) *			
FROM:			
LEVEL 0	STEP NO. 10	MODULE PLOOP (PLOOP)	
VARIABLES LIST (OUTPUT)			
1. WPOUT	2. WSOUT	3. TPOUTN	4. TPOUTP
5. TSOUTN	6. TSOUTP	7. TCHP	8. TWHP
9. TCCP	10. TWCP	11. TPP	12. TWP
13. TSP	14.	15.	16.
17.	18.	19.	20.
TO:			
LEVEL 0	STEP NO. 09	MODULE TPOWR (TPOWR)	
1. FSPOW	2. OCPOW	3.	4.
5.	6.	7.	8.
9.	10.	11.	12.
13.	14.	15.	16.
17.	18.	19.	20.
CONNECT FROM ____ TO			
NEXT → PF7 , EXECUTE → ENTER , END → PF15			

図3-9 CRTS での引数結線を設定するメニュー画面(置換関係)

3.2.3 カラーグラフィックを用いた結線状態の確認修正システム (CGKS)

上述の CRTS では、引数の結線の際にその引数の意味や使い方などを参照しながら作業ができるため、モジュールデータベースを参照する手間が省けるものの、CRT 画面に対峙して作業を行うため、結線状況の把握は難しかった。CRTS で生成されたモジュール結線データは、結線ファイルと呼ばれる VSAM ファイルに収納されており、CGKS はすでに作成されている結線ファイル内の結線情報を用いて、モジュール統合上、複雑なモジュールの並びや引数の結線についてカラー図形で表示して確認修正をできるようにしたものである。そのため、引数の結線について直観的な理解が得られるとともに、直接的な操作によって修正することも可能である。CGKS では、CRTS の機能に対応して、シミュレーションスキーム、インタフェーススキームおよびアウトプットスキームの表示、確認、修正を行う。図3-10に、インタフェーススキーム設定（相等関係）の場合の画面例を示す。



↓ (写真が見つらいためレイアウトを示す)

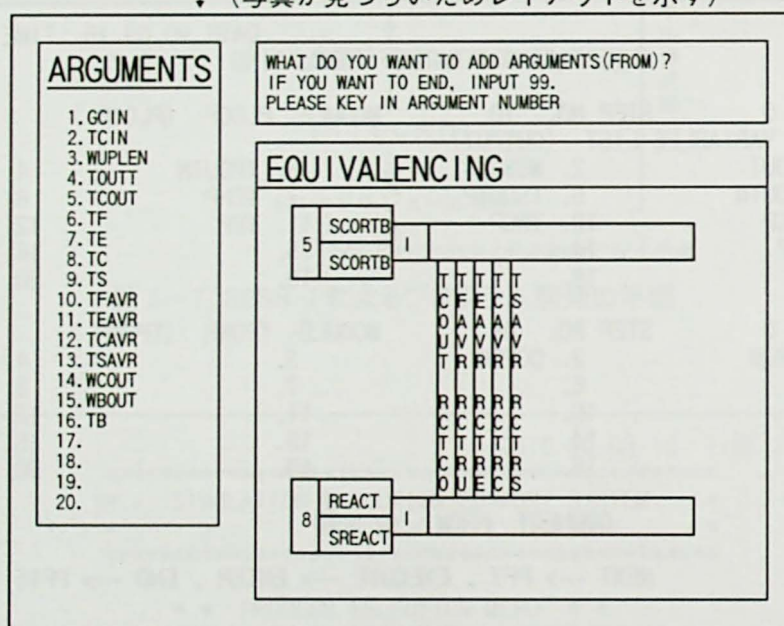


図 3-10 CGKS での引数結線を設定するグラフ表示画面(相等関係)

CGKS により上記の3つのスキームの修正を行うと、その結果、結線ファイルの修正も行われるので、その後は CRTS に戻ってプログラム情報や可変寸法設定の修正、HDL 記述リストの自動生成が行える。前述のように、CGKS はカラーグラフィックス端末を用いて、モジュールの統合状況がカラー図形で表示される。例えば、CRTS によるインタフェーススキーム設定では引数結合情報を1つずつ順次入力していくため、全体的な結線が理解しにくいのに比して、CGKS では全体的な結合状態が視覚的に把握され、モジュール結合のデバッグが容易になる。

3.2.4 SESS-1 によるプログラム自動生成とプログラム開発効率の検討

以上のヒューマンインタフェース SESS-1 のソフトウェア生産性面の効果を調べるため、実際に SESS-1 を用いてシミュレーションプログラムを作成した。対象とする問題は LMFBR プラント1次系の熱流動特性計算用のシミュレーションプログラムである。表 3-4 に使用したモジュール個数および結線数、生成されたプログラムのサイズおよび SESS-1 の各作業ステップの所要時間を示す。この結果

では、メインプログラムの FORTRAN 文で約 1,500 行、実行可能なプログラムの FORTRAN 文で約 20,000 行程度の大型プログラムの作成を約 1.5 時間の計算機との対話作業で完成した。

MSS によるシミュレーションプログラム生成は、異なったシミュレーションプログラムを個人で多数生産する場合にその効果がより一層現れるものであり、現在の原子力コード作成法との全体的な時間的、労力的比較は直ちにはできないが、SESS-1 によるシミュレーションプログラムの自動生成の結果に絞って考察する。

表 3-4 SESS-1 による LMFBR 1 次系熱流動特性解析プログラム作成時の所要時間

1. モジュール統合によるシミュレーション			
プログラムの規模			
使用モジュール数	定常計算		8個
	過渡計算		8個
	合計		16個
モジュール間の引数結線数			106個所
メインプログラムFORTRAN行数			1,490行
シミュレーションプログラム			
FORTRAN行数			21,582行
2. 結線ファイル作成			
全所要時間			約1h
(内訳)			
シミュレーションスキーム設定			5min
インタフェーススキーム設定			35min
アウトプットスキーム設定			10min
配列寸法・コメント入力			17min
3. ディレクトリファイル生成			
全所要時間			25min
(内訳)			
ファイル名定義及びグラフ用			
キャプション入力			20min
HTSCによるメインプログラム生成			
およびロードモジュール化			5min

この試行では、モジュールの選択や結線すべき引数の組合せなどの情報は予め整理されているが、それでも単純にこの程度のサイズの大型 FORTRAN プログラムのソースリストをキーボードから入力するのに要する時間だけを比較しても、今回開発した SESS-1 はソフトウェア生産性の向上に非常に効果があることを示したものと見える。

SESS-1 の機能により、フローに沿った対話操作によりシミュレーションプログラム作成作業が円滑に行えるようになったばかりでなく、ファイル管理等のプログラム作成以外の作業からユーザは解放され、メニュー画面による選択入力方式を多用したことによりユーザのミスタイプが大幅に減少し、ルールを内蔵したことで論理ミスも未然に防げるようになった。さらに、CRTS の外部ユーティリティとしてのカラー図形表示による結線情報の確認、修正、変更システム CGKS は、一旦生成されたシミュレーションプログラムの正しさの確認や、一部のモジュールの取替え、追加などの修正に有効である。なお、SESS-1 により作成されたシミュレーションプログラムによる実際の解析事例の詳細は付録 A に譲る。

以上の例では、SESS-1の使用によりプログラム作成はほとんどコンピュータが行うので、シミュレーションプログラム開発作業には時間的な負担はかからず、解析作業に専念できた。すなわち、「解析モデル」（モジュール）と問題に対応した「モデルの組立て方」とが問題の解決の上で本質的であると考えて、ユーザは、その本質に即したプログラムを適宜作成していくことで、より高次の創造性のある作業に集中できると考えられる。

また、以上の解析計算作業では、3段階のプログラム作成、反復計算による定常設定のための入力パラメータの探索を含めた個々のプログラムへの入力データの設定、試行錯誤の伴った計算実行および過渡解析計算結果の SPLPACK によるグラフ化の全体を、1人の解析者が5日間の作業で行った。そして、この過程で、特に入力データの数値設定の効率化が、解析作業上の問題として摘出された。すなわち、入力データの数値を決めるための検討や、その数値の算出、試行錯誤で計算結果を見て入力データを修正するなどの作業の時間的比率が大きかった。なお、この効率化は、次に述べるシミュレーション実行支援インタフェース SESS-2 で実現する。

3.3 シミュレーション実行支援インタフェース SESS-2

3.3.1 シミュレーション実行支援インタフェースの構成

AI 技術を用いるシミュレーション実行支援インタフェース SESS-2 の開発には、AI ワークステーション Tektronix4404 上で、フレーム構造知識ベースが容易に構成できるソフトウェア環境としてオブジェクト指向言語 Smalltalk-80^[5]を用いた。なお、図 3-1 に示したモジュール統合型シミュレーションシステムのうち、中核システム部全体とヒューマンインタフェース部の MDMS と SESS-1 は、前述のように汎用計算機 FACOM M-340R によりソフトウェアシステム化を行った。また、SESS-2 の開発では FACOM M-340R をホストコンピュータとし、AI ワークステーションとホストコンピュータとを TSS 接続する形で処理の分散化を図った。

3.3.2 解析用専門知識の知識ベース化と知識処理の手順

SESS-1 により生成されたシミュレーションプログラムを用いてユーザが解析を行う場合には次の 4 つの専門的知識や情報を用いている。

- (1) シミュレーションプログラムを構成する各モジュールの計算内容やその引数の使い方、意味などの情報
- (2) 各種物質の物性値、あるいは原子力プラントを構成する構造物の寸法、物理定数などのデータ
- (3) 生成されたシミュレーションプログラムが規定する、そのプログラムを実行する上で必要な情報
- (4) シミュレーションの対象とする原子力プラントの構成に関する知識

SESS-2 では、これらの知識情報を表現するため、Minsky によるフレーム表現法^[6]を用いることとし、これら 4 種の知識情報をそれぞれフレーム構造をもった知識ベースとして構成して、それぞれモジュールデータベース、物性値フレーム、プログラムフレーム、原子炉フレームと名付けた。（なお、システム内では、各々のフレームのトップレベルの名前を英語とし、それぞれ ModuleDataBase、PropertyValueFrame、ProgramFrame、ReactorFrame と名付けている）。SESS-1 で生成されるシ

ミュレーション実行のための環境の整備（シミュレーションプログラム、入出力データファイルおよびそのガイドファイルの生成）と、AI ワークステーション上でのシミュレーション実行に必要な数値入力データ作成に至る 4 つの知識ベースを用いた知的処理の流れ図を図 3-11 に示す。

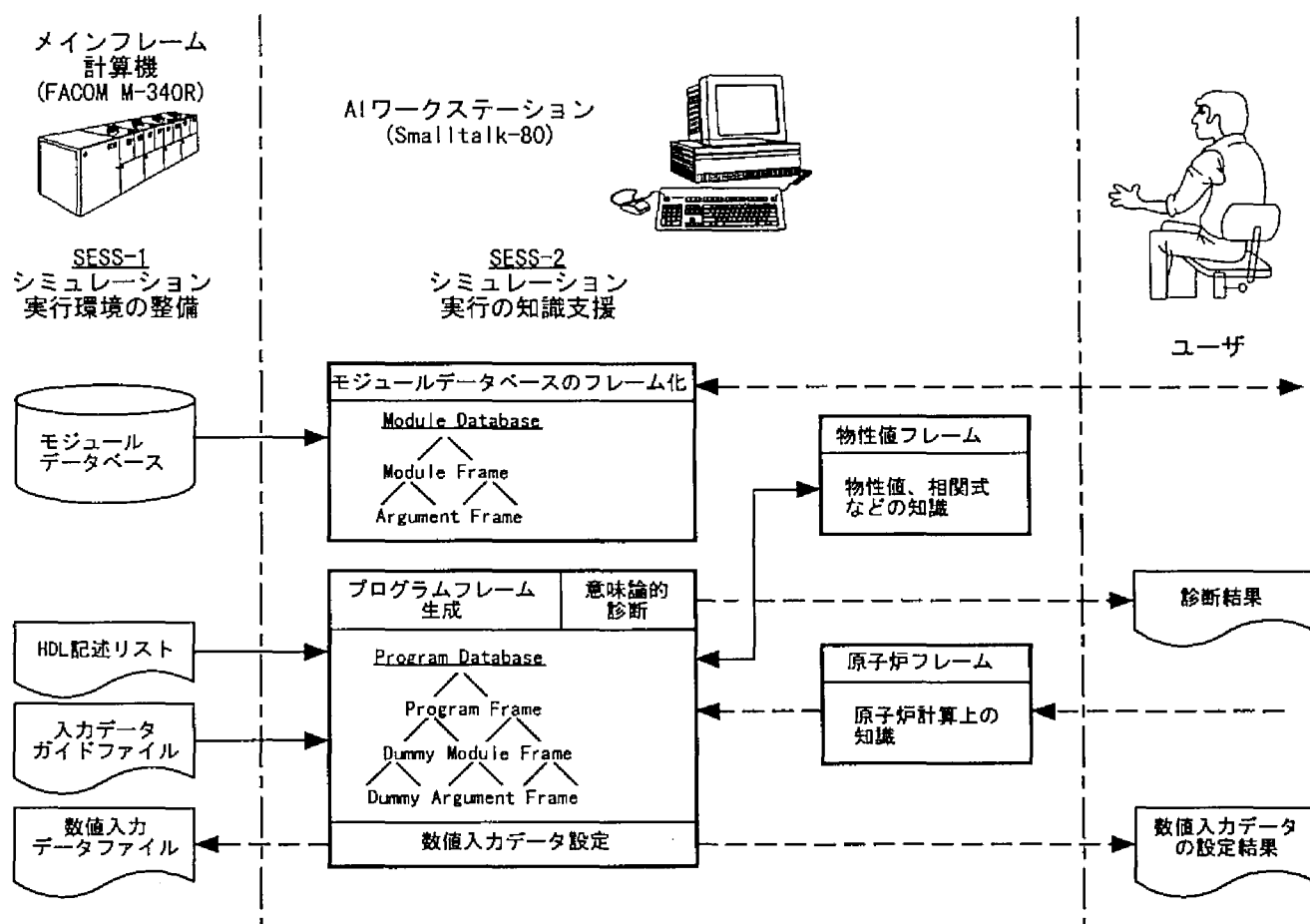


図 3-11 SESS-2 での各種知識ベースと知識処理の流れ図

図 3-11 では、まずホストコンピュータ上のモジュールデータベースの内容を AI ワークステーションに転送し、フレーム構造で再構成する。また、プラント解析に必要なデータを蓄積する物性値フレームは、ユーザが AI ワークステーションとの対話であらかじめ作成しておく。

SESS-1 で自動生成されるシミュレーションプログラムの構成は、簡易言語で記述される HDL 記述リストと内容的には等価である。一方、シミュレーションプログラムの入力データの作成方法は入力データガイドファイルにその詳細が記述されている。また、シミュレーションプログラムを構成するモジュール群の情報はモジュールデータベースに収録されている。そこで、HDL 記述リスト中のモジュール引数間の接続情報（結線情報）を対象にその意味論的整合性を、3.3.3 項に述べる方法で診断しながら上述の 3 つの知識ベースを用いてプログラムフレームを生成し、かつ疑わしい結線をプリンタ出力でユーザに通知する。

以上の意味論的な診断でプログラムの正当性を確認し終えた後、シミュレーション実行に必要な数値を入力データファイルに設定する作業に進む。このため、SESS-1 で作成された個々のプログラムに対応して、そのプログラムの解析用途によって、対象とする原子炉やプラントの仕様、条件をあらかじめユーザが原子炉フレームに構成しておく。そして、3.3.4 項に述べる知的インタフェースにより適切な

入力値が決定され、入力データファイルに書き込まれてホストコンピュータに転送される。

以上のようなシミュレーション実行支援用インタフェースに必要な4つの知識ベースについて以下にそれぞれの構成を説明する。

3.3.2.1 モジュールデータベース (ModuleDataBase)

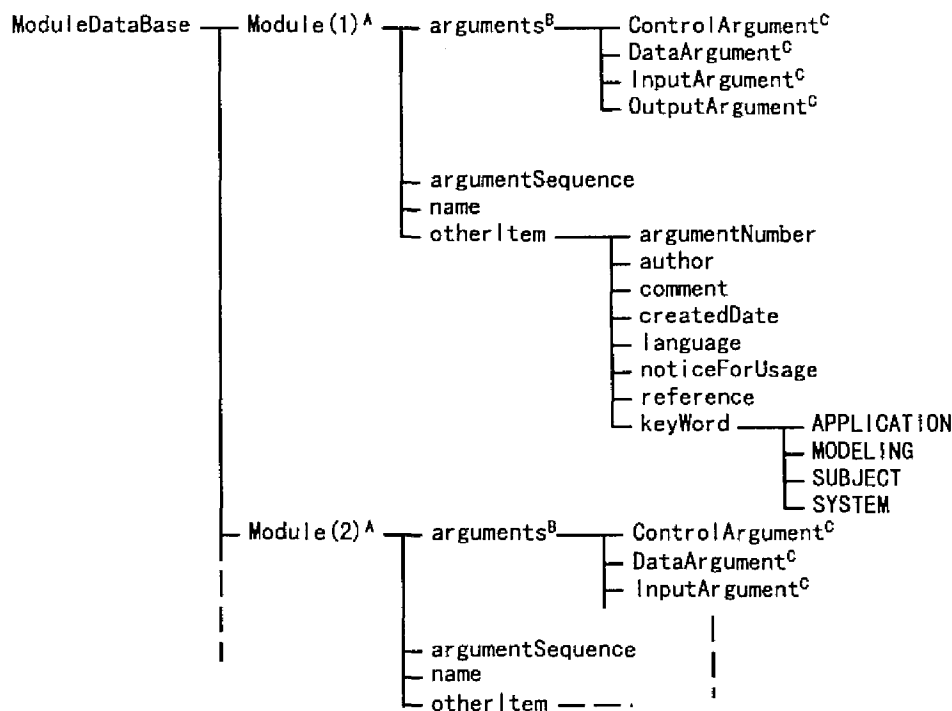
モジュールデータベース (ModuleDataBase)は図 3-12(a)に示すような構造とした。図中ではマーカおよびサブフレームが入るスロットだけを示し、データが入るスロットは省略している。以下では図中のアルファベットで示したスロットの内容を説明する。

- A. Module(1), Module(2)は、プログラムバンクに蓄えられた各モジュールに関する知識を表現したサブフレームである。このサブフレームのトップレベルは、モジュール名で表される。
- B. arguments は、モジュールで使われている引数に関する知識を表現したサブフレームである。
- C. ControlArgument, DataArgument, InputArgument, OutputArgument モジュールの引数は、4つのカテゴリに分けられる。すなわち、CONTROL, DATA, INPUT, OUTPUT の4つである。Cはこれらの引数に関する知識を表現したサブフレームであり実際には引数名で示される。

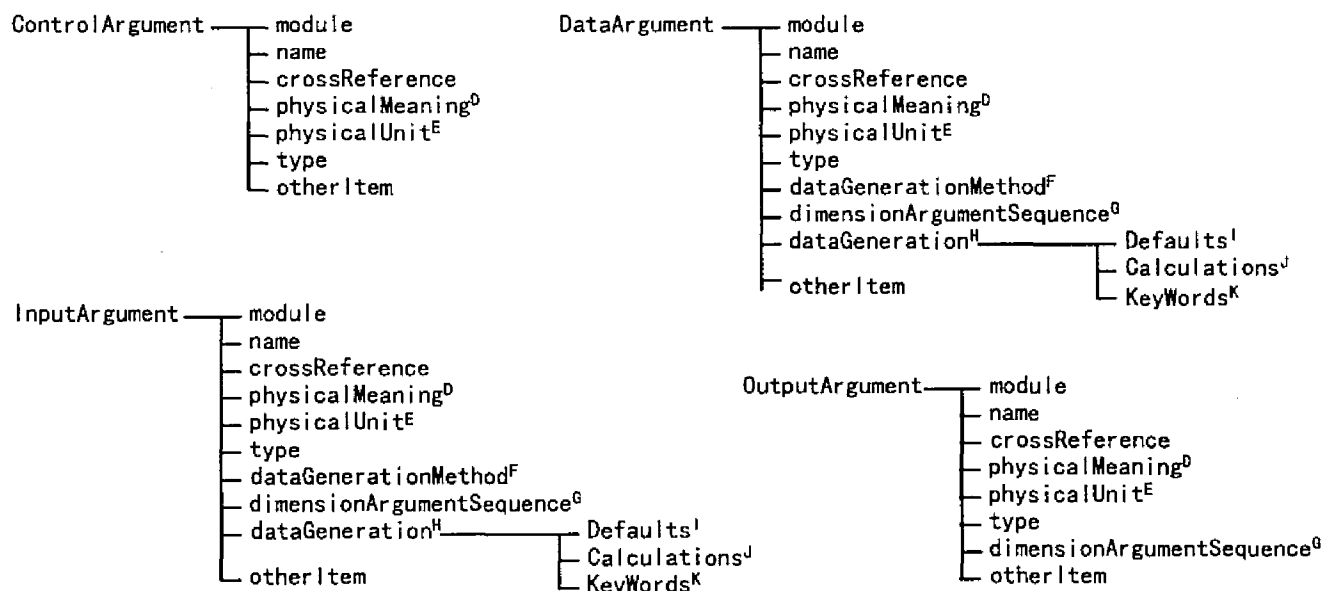
カテゴリ分けされたモジュール引数のサブフレーム C は、図 3-12(b)に示すような構造となっている。これらのサブフレーム中の主なスロットについて以下に説明する。

- D. physicalMeaning 引数の物理的意味の説明。
- E. physicalUnit 引数の単位。
- F. dataGenerationMethod データ生成方法の説明。
- G. dimensionArgumentSequence 引数の配列寸法を CONTROL カテゴリの引数によって示したもの。
- H. dataGeneration データ生成の際、手がかりになる情報を表したサブフレームであり以下の情報から構成されている。
- I. Defaults その引数の標準的な値とその使用条件。
- J. Calculations その引数の値を求めるための計算式とその計算式が利用できる条件。
- K. KeyWords データの自動生成のための手がかりとなる単語。ここには、モジュール検索のためのキーワードが設定されるが、これには異なった4つの観点(Application、Modeling、Subject、System)からキーワードが登録されている。

また、4つの Argument に共通なスロットには、意味論的診断に用いるための引数の情報が書き込まれている。すなわち、crossReference は、別の引数との接続情報（クロスリファレンス；後述）、physicalMeaning には引数の物理的意味の説明文、physicalUnit にはその引数の物理単位、type には引数の変数タイプが入る。



(a) 全体フレーム



(b) 4つの Argument サブフレーム

図 3-12(a)、(b) モジュールデータベースの全体フレームおよび4つの Argument サブフレームの構成

3.3.2.2 物性値フレーム (Property Value Frame)

物性値フレーム(Property Value Frame)は、物性値や構造物の寸法および物理定数など、モジュールやプログラムに関係なく、原子力プラントを構成する材料、物質やプラント設備に特有の知識を表現したフレームである。このフレームは、図 3-13に示すような構造を持っている。図中の Material は、物質やプラント設備などの名称で表される、それらの材料を知識表現したサブフレームである。Property はそのサブフレーム内のマーカであり、Material の性質を示したものである。そして、その

スロットには値や計算式およびテーブルなどが入る。

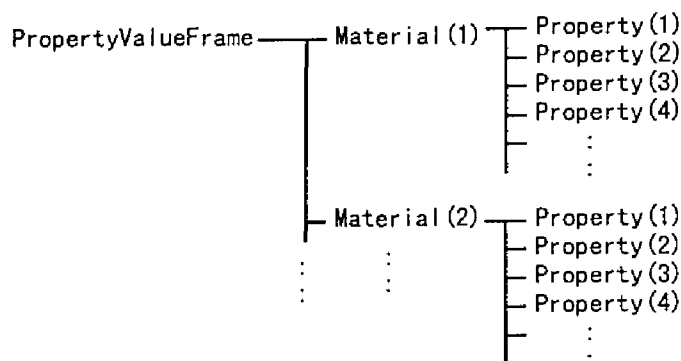


図 3-13 物性値フレームの構成

図 3-14に具体例を示す。この例では、Property Value Frame は、Sodium や Stainless Steel などの物質名をトップレベルとするサブフレームから構成されており、それぞれのサブフレームは密度や比熱などの物性値やその物性値を求めるための計算式およびテーブルから構成されている。

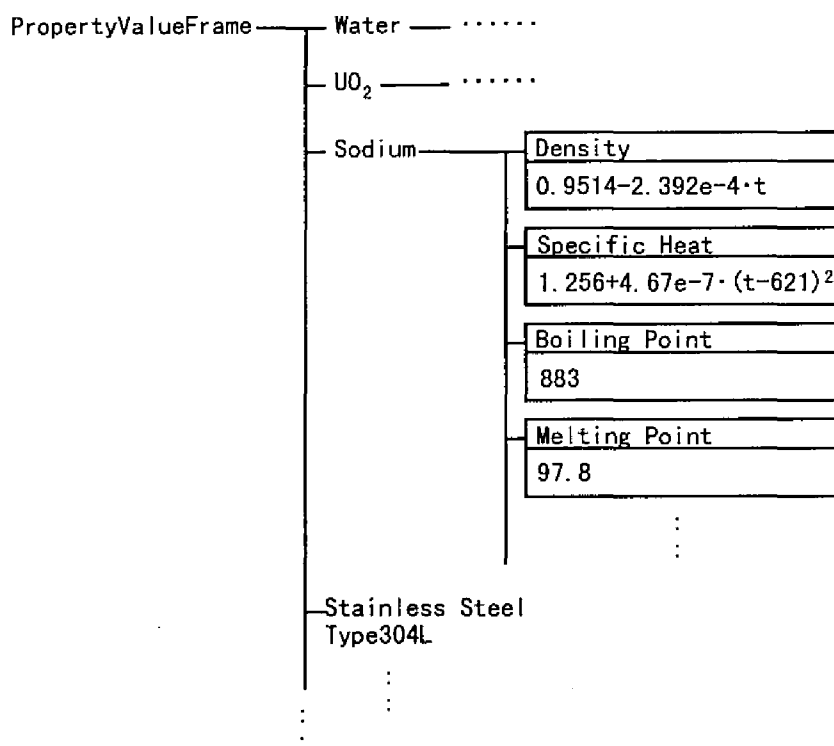


図 3-14 物性値フレームの具体例

3.3.2.3 プログラムフレーム (ProgramFrame)

プログラムフレーム(ProgramFrame)では、SESS-1 で作成された各々のプログラムの情報が Program(i)をトップフレームとして定義される。図 3-15にその構成を示し、図中のアルファベットで示したスロットの構造を以下に説明する。

- A. Program(1), Program(2) 各シミュレーションプログラムに関する知識を表現したサブフレームであり、プログラム名で表される。

- B. scheme シミュレーションプログラム中に使用されているモジュールよりなるサブフレームを表すマークである。
- C. DummyModule(1), DummyModule(2) シミュレーションプログラム中で使用されているモジュールに関する知識を表現したサブフレームである。
- D. arguments そのモジュールの引数よりなるサブフレームを表すマークである。
- E. inheritance モジュールデータベースに登録されたモジュール名が入っている。
- F. dummyName 生成されたシミュレーションプログラム中で用いているモジュールを表す名称（仮モジュール名）が入る。
- G. ControlDummyArgument, DataDummyArgument, InputDummyArgument, OutputDummyArgument プログラム内での DummyModule の引数に関する知識を表現したサブフレームであり引数名で表される。引数のカテゴリによって4つに分けられる。

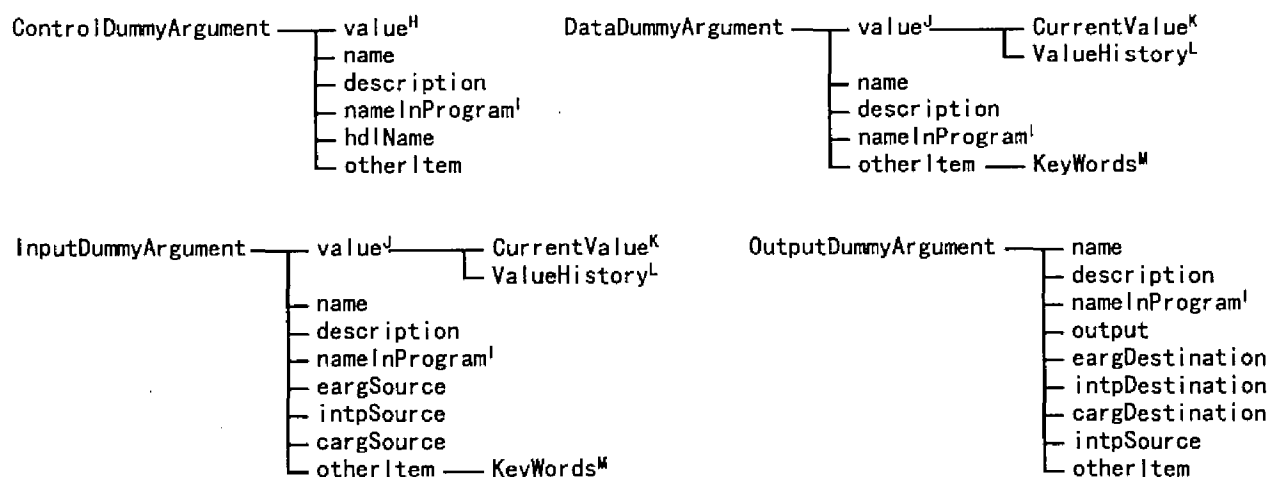
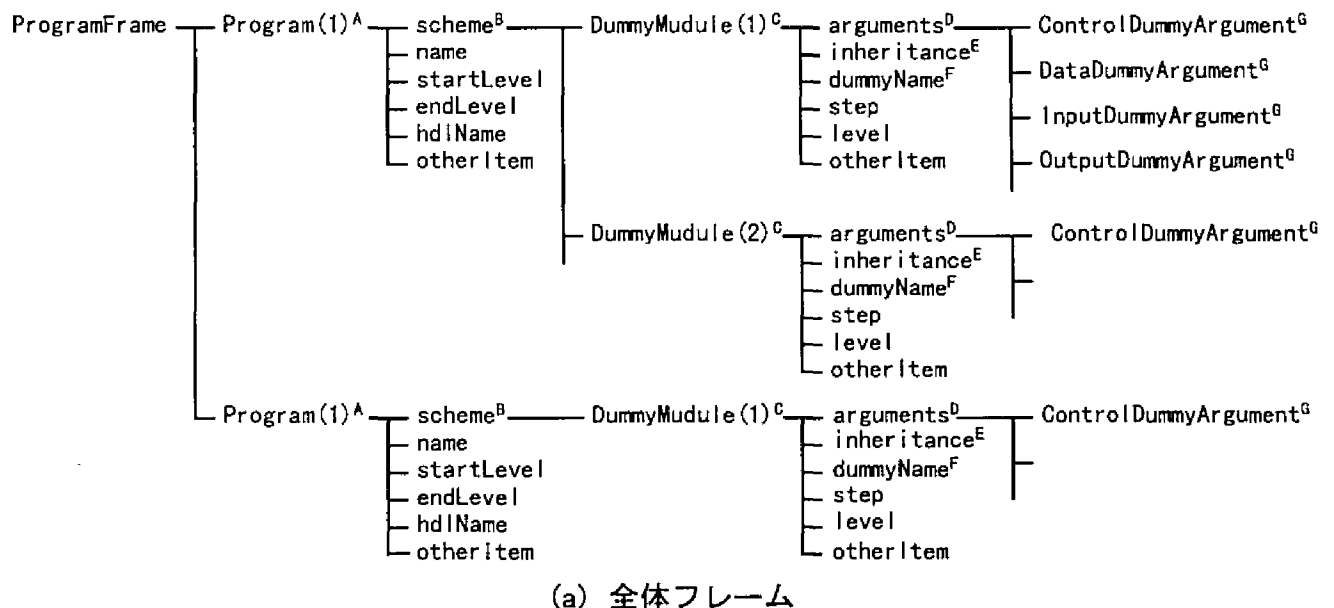


図 3-15(a)、(b) プログラムフレームの全体フレーム、および4つの Argument サブフレームの構成

DummyModule のサブフレームの構造を図 3-15(b)に示す。また、図中の各スロットには以下のものが入る。

- H. value CONTROL カテゴリの引数の値はプログラムを生成した時点で決まるため、ControlDummyArgument 内の value には、その引数の値が入っている。
- I. nameInProgram 生成されたメインプログラム内での引数の名称が入る。
- J. value DataDummyArgument、および InputDummyArgument 内の value には、数値入力データ作成の際に決定した値や過去に作成された値などの知識を表したサブフレームが入る。
- K. CurrentValue 数値入力データ作成作業中に決定した値を格納する。
- L. ValueHistory 過去に作成した数値入力データの履歴が入っている。
- M. KeyWords 数値入力データを自動生成する際に手がかりとなる単語が入る。

上記の KeyWords にはユーザからの修正がなければモジュールデータベース中の各引数のキーワードが自動的に設定される。そしてこのキーワードを用いて3.3.4項に述べる数値入力データ設定支援で value スロットに数値を設定する。また、Input および OutputArgument 中で、例えば eargSource および eargDestination は HDL 記述リスト中で引数の結線先のモジュール引数名が指定されている。これらのデータは3.3.3項に述べる意味論的診断に用いられる。

3.3.2.4 原子炉フレーム (ReactorFrame)

原子炉フレームは、シミュレーションを行う原子力プラントの各構造物の材料や構成などに関する知識を表したフレームであり、図 3-16のような構造を持っている。図に示すように、このフレームは各シミュレーションの対象となる原子力プラントの仕様を表すサブフレームにより構成されている。このサブフレームのトップレベルは、シミュレーションプログラム名であり、プラントの構成物名を表すマーカ（図中の Specification）とその材質を表すスロットからなる。

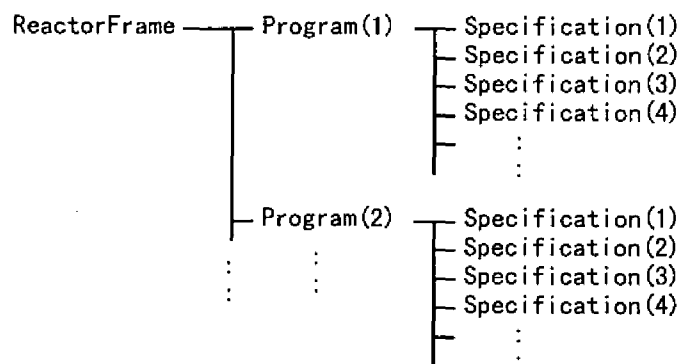


図 3-16 原子炉フレームの構造

3.3.3 自動生成されたプログラムの意味論的診断

シミュレーションプログラムを自動生成する SESS-1 では、構文上の自動診断機能のみが組み込まれているだけであり、プログラム文法的には正しくても意味論的整合性の観点では、ユーザの本来の意図が達成されていないプログラムが生成されている可能性がある。確かにカラーグラフィックを用いた CGKS により結線状況の把握が容易になってはいるものの、プログラムが大きくなると誤りが混入し

ている場合もある。これまでの SESS-1 によるシミュレーションの試行経験では、意味論的に正しくないプログラムを作成している場合、その原因として、モジュール統合の際のモジュール間の入出力変数間の対応、すなわち引数の結線におけるミスがほとんどであった。SESS-1 では、次元数の異なる引数の結合等のプログラム文法上のエラー入力に対しては直ちに画面上にエラーメッセージが表示され、その場で修正を促すが、引数の意味のチェックまでは行っていないので、例えば温度と流量といった異なった性格の引数を結線している恐れがある。

このような意味上の整合性に関するエラーの摘出、診断を行うため、モジュールデータベース中のモジュール引数情報と、プログラムを統合する際のスキームを与える HDL 記述リストを用いて引数結線の意味論的診断を行うソフトウェアシステムを作成した。すなわち、MSS では生成されるシミュレーションプログラムと HDL 記述はシミュレーション実行の論理的、意味論的見地からは全く等価であるので、診断対象には HDL 記述中で結合されている 1 対の引数について、①物理量としての単位、②変数のタイプ（整数型、実数型、論理型）、③変数の意味を説明するストリング（英文で記述された文）、④クロスリファレンス情報（この引数は他のモジュールの引数とは指定された理由により必ず結合させる必要があるという記述）の Argument サブフレーム中の 4 種の情報を比較して結線の妥当性を判断するものとした。この知識情報処理プログラム処理の流れ図を図 3-17 に示す。

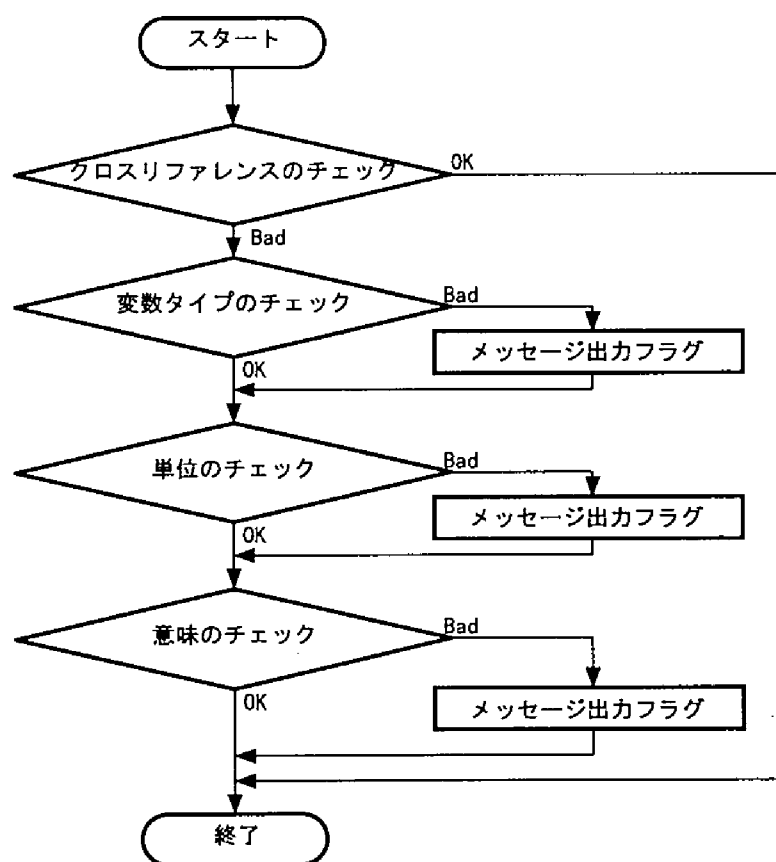


図 3-17 結線の妥当性の意味論的診断処理の流れ図

結線の妥当性は、まず結合されている 1 対の引数の各々のクロスリファレンス情報のチェックを行い、少なくともいずれかで相手の引数が参照されていればこの結線は正しいとみなし、次の結線についてのチェックに移る。クロスリファレンスで参照されていない場合には、変数タイプ、単位、物理的意味に対して照合評価を行う。なお、照合評価は 100 点を満点とする点数評価とするが、合格点はチェック

を開始する前にユーザが設定する。単語の照合ではモジュールデータベース中の文章や単語にミスタイプも存在することを考慮し、1文字程度の誤字、脱字についてはエラーとみなさないようにしている。

まず、変数タイプの比較では、全体の何%の文字が一致するか（ただし1文字の脱字は考慮）を調べる。例えば、‘INTEGER’と‘INERGER’は1文字だけの誤りとみなして評価するような文字照合評価関数を用いている。そして、以下の2つの評価にも、単語の照合にはこの関数を用いた。単位の照合では、同じものでも表現方法が異なる場合がある（流量の場合 GRAM/SEC と G/S など）ので、変換テーブルにより標準的な内部表現に換えて照合を行う。点数規則を表 3-5に事例をあげて説明すると、(1)、(2)は照合がとれた場合である。(3)、(4)はミスタイプの例で評価点はミスタイプされたものを内部表現に変換する際の信頼性を評価点としてそのまま出している。(5)～(7)は特殊なケースで、(5)は‘OR’の概念を持つことを示す。(6)、(7)は単位が「任意」の場合の評価で、この場合ユーザが設定した配点表により、同じものの比較が INPUT、OUTPUT の対の指定で異なって採点されている。最後に(8)は完全に照合がとれない場合で評価点はゼロとなる。

表 3-5 意味診断における単位照合の事例

ケース	結合元の単位	結合先の単位	評価点
(1)	DEG-C	DEG-C	100
(2)	G/SEC	GRAM/SEC	100
(3)	DEG-C	DEC-G	60
(4)	DEG-C	DEG-C.	83
(5)	DEG-C	K OR C	100
(6)	ARBITORARY	W	0
(7)	W	ARBITORARY	80
(8)	W	W/CM**3	0

物理的意味を説明する文章（英文）はモジュールデータベース中では、100文字以下の短文である名詞句で記述されている。そこで、文章そのものの統語論的構文解析から始める自然言語解析法^[7]は効率の面から用いず、文章中の前置詞の性格により単語を性格分けし、入出力側の単語の照合を行うというテンプレート方式を用いた。いわば、表層的な意味論的解析法である。事例を挙げて説明すると、いま表 3-6に示すような OUTPUT、INPUT 側の2つの引数の意味を説明する文章では、まずおのおのの文中の最初に現れる前置詞の直前の名詞 temperature をメインワードとする。メインワードにかかる単語は修飾の範疇の単語である。そして、メインワード以降は前置詞 (of, in, from, to, into, at) に応じてそれぞれ修飾、場所、移動元、移動先、時間を表すグループに分けておのおのの照合を行う。

物理的な意味チェックの総合得点はメインワードの照合とその他の修飾、場所、その他のグループの単語群の照合結果に各々あらかじめ定めた荷重をかけて点数を求める。表 3-6の例文では、まずメインワードは完全に照合がとれているので、点数はウェイト分の20点である。また、その他の単語については照合すべき単語数4つのうち、3つが照合されているので点数はウェイト80点の3/4で80点とする。そして、これらの両者の和80点が総合評価点となる。

表 3-6 意味診断における引数の物理的意味の説明文の照合と評価点の事例

OUTPUT側引数の説明文

CHANNEL-WISE OUTLET TEMPERATURE OF COOLANT FROM PLENUM AT PREVIOUS TIME

INPUT側引数の説明文

INLET TEMPERATURE OF COOLANT FROM LOWER PLENUM REGION AT PREVIOUS TIME STEP

	OUTPUT側	INPUT側	照合割合
メインワード (ofの直前)	TEMPERATURE	TEMPERATURE	1
場所 (inの後)	なし	なし	0
修飾 (メインワードの 直前、ofの直後)	CHANNEL-WISE OUTLET COOLANT	INLET COOLANT	1 / 2
移動元 (fromの後)	PLENUM	LOWER PLENUM REGION	1 / 1
移動先 (to, intoの後)	なし	なし	0
時間 (atの後)	PREVIOUS	PREVIOUS	1 / 1

	照合割合	ウェイト	点数	総合得点
メインワード	1	20	20	80
その他のグループ	3 / 4	80	60	

このようなテンプレート方式による意味論的診断では、表 3-6のうち修飾を表す単語の inlet と outlet は実際は同じことを意味しているにもかかわらず、単語が同じか否かで照合しているため、照合割合が低くなるという問題がある。すなわち、この例では、下部プレナムから流出する冷却材の温度と炉心に流入する冷却材の温度を結合している。inlet と outlet はこの場合、異なる視点からみた場合の修飾語であり、本質的には同じ意味である。

以上のような診断結果は、変数タイプ、単語、物理的意味のうち1つでも合格点に満たなかった時は画面に出力するだけでなくユーザに再確認を促すためにプリンタにも出力される。図 3-18に、疑わしい結線のある場合の出力例を示す。この例では結線先の引数 (DestinationArgument) の単位情報がモジュールデータベース中に登録されていないために疑わしい結線として出力されたものである。

HDL Checker start

Program Name > TEST02
Kessen File Name > TEST02
Check Level > 60

I doubt this connection in *earg* considering *unit* of each argument.

RCCR0 of REACT to REACT0 of NTPRMJ

```
----- Source Argument Information -----  
RCCR0 of REACT  
TYPE > REAL  
UNIT > DELTA-K/K  
MEANING > COEFFICIENT OF REACTIVITY FUNCTION;  
          REACTIVITY=RCCR0 + RCCR1*TIME L RCCR2* TIME**2  
  
----- Destination Argument Information -----  
REACT0 of NTPRMJ  
TYPE > REAL  
UNIT >  
MEANING > FIRST COEFFICIENT OF REACTIVITY FUNCTION  
          REACT(TIME)=REACT0+REACT1*TIME+REACT2*TIME**2
```

図 3-18 疑わしい結線についての診断結果の出力リスト例

また、以上の意味論的診断に要する処理時間を測定するため、SESS-1 で自動生成された LMFBR プラント 1 次系熱流動特性を模擬するシミュレーションプログラムについて結線の意味論的診断を行った。この場合、16 個のモジュールから構成される約 20,000 行のプログラムで結線数が 106 対であったが、AI ワークステーションによる処理時間は 108(s)であった。これは、人間が 106 対もの結線の適否を 1 つずつ判断する労力と時間に比較すると非常に効果的といえる。なお、この例では正しい結線についても疑わしいものとして出力されるものもあったが、この理由には前述のような視点の変化が考慮されていないことや、単にモジュールデータベース中のデータが正確に入力されていないことがほとんどであった。しかしながら、多数の結線について一定の基準で僅か 2 分たらずでふるいにかけ、その後、疑わしいと診断されたものだけをユーザが調べるようにすることでユーザの負荷軽減に効果があるといえる。

3.3.4 数値入力データ作成支援

SESS-1 では、シミュレーションプログラムと関連入出力ファイルを自動生成するが、計算を実行するための数値入力データ作成作業そのものはユーザが行う必要がある。そのためユーザは、SESS-1 が作り出す入力データガイドファイル (RDDTinfo、MKDTinfo) を参照し、どのような値が必要かを調べ、物性値表またはプラントの設計図などから求めるべき値を調べ、計算して適切な値を定め、数値を入力データファイル (RDDT、MKDT) に書き込む必要があった。

ここではユーザ自身の専門的知識や解析経験がバックグラウンドとして要求される。そこでこのようなエキスパート的知識をあらかじめ「知識ベース化」し、数値入力データを容易に作成できるようにするため、以下のように考えた。

- (1) 入力すべき数値を決定する際には、いくつかのデフォルト値や計算式が用意されていてそれらを利用できるようにする。
- (2) 入力すべき数値が明らかである場合は、ユーザがその値を求めなくとも自動的に決定する。

(3) SESS-1 で生成されたシミュレーションプログラムの数値入力データは、各モジュール単位で独立した設定されるようになっている。しかし、定常計算用モジュールと過渡計算用モジュールで同じ数値を重複して代入することが多い。このように重複するものはユーザが幾度も値を入力する必要がないようにする。

(4) 決定した数値から自動的に入力データファイルを作成する。

(5) これらの作業の操作を容易に行えるようにする。

ここでは特に数値入力データ作成支援の要となる(2)の数値入力データ自動生成法について、図3-19(a)、(b)の例を用いて説明する。

モジュール名	: C O R T B . . .	原子炉炉心の熱流動計算
引数名	: C C . . .	冷却剤の比熱

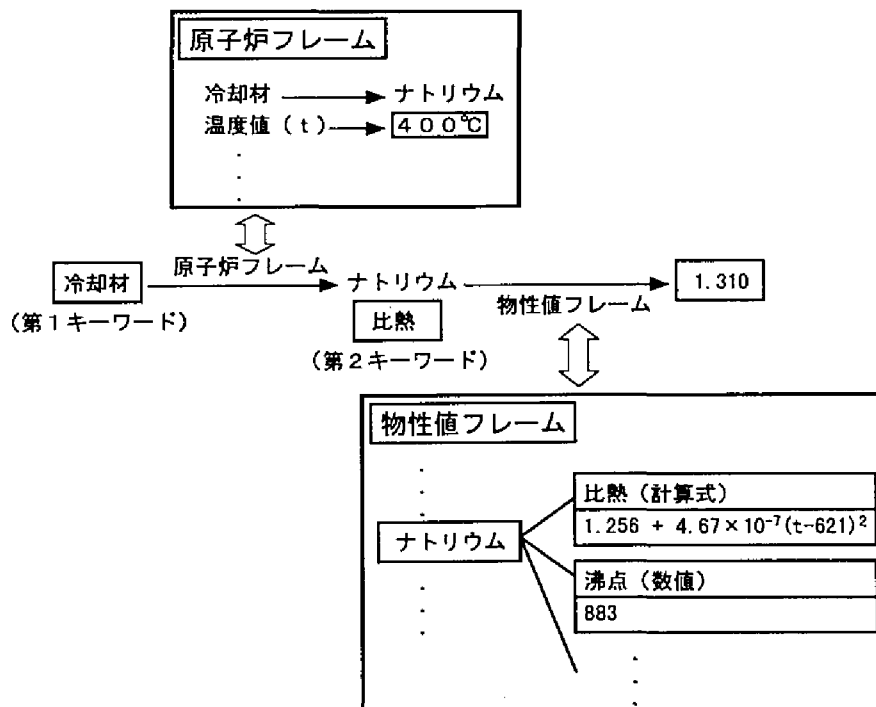
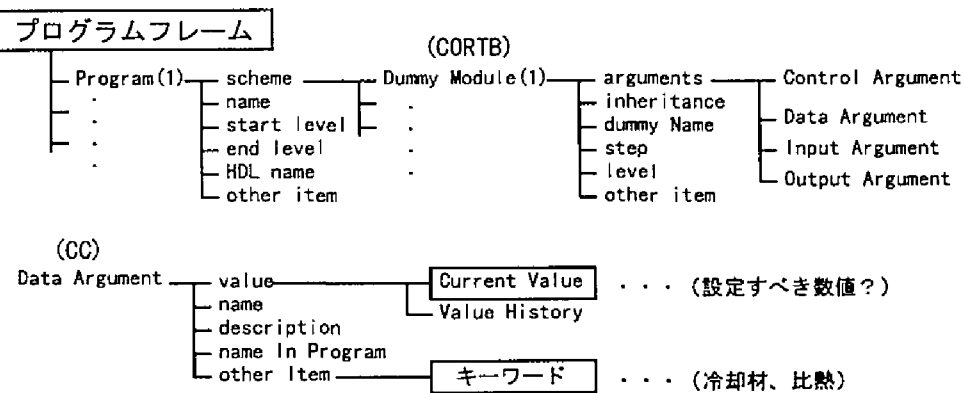


図3-19(a)、(b) 数値入力データの自動設定の方法

これは図 3-15(b)に示したプログラムフレームの構造の説明で述べたように、サブフレームである DataDummyArgument および InputDummyArgument 中のスロット value に数値を設定することに対応するが、これを自動的に行うため、スロット Keywords 中の引数の物理的意味を代表する2つの単語からなるキーワードを用いる。この2つのキーワードのうち最初の単語では、引数が関係するプラントの構造材等の名称を表し、次の単語では、その構造材について求めるべき物性値を表す。この一例として、図 3-19(a)でモジュール名 CORTB の引数 CC の値を生成する場合について説明すると、炉内の過渡熱流力特性を計算するモジュール CORTB の引数 CC には、炉心部分の冷却材の比熱の値を代入する必要がある、最初の単語は“冷却材”、次の単語は“比熱”となっている（実際は英単語）。この2つの単語からなるキーワードと上述の原子炉フレーム、物性値フレームを用いて値を決定する方法を図 3-19(b)に示す。そのステップは、

- (1) まず、キーワードの第1単語に対応するものを原子炉フレームから検索する。図中では、第1単語“冷却材”が“ナトリウム”に置換される。
- (2) 次に、物性値フレームから(1)で得られた単語に対応するサブフレームを抜き出す。これは、この物質（ナトリウム）を表すサブフレームである。
- (3) 最後に、このフレームからキーワードの第2単語に対応するスロットを検索し数値を決定する。図中では、ナトリウムの比熱の計算式に対応する。この例では、比熱を計算するために温度値(t)が必要である。原子炉フレームに温度値が指定されていればこれを用いて直ちに計算できるが、指定されていない場合には、システムの方からユーザにその数値の入力を要求する。この入力値はその後の処理に使用できるように原子炉フレーム中に登録される。

このようにして数値を決定するが、探すべき語が各知識フレーム内に存在しない場合には、計算機内の知識だけではその数値を自動的に決定することができない。この場合は、図 3-12(b)に述べたモジュールデータベース中に用意されたデフォルト値や計算式を用いてユーザ自身が数値を設定しなければならない。しかし一旦、このように設定すると、これが原子炉フレーム中に新たに組み込まれるので、2度目以降は自動的に設定が可能となる。

このような自動生成機能を持った数値入力データ作成支援システムは、SESS-1 により生成される HDL 記述リスト、入力データガイドファイルを AI ワークステーション (Tektronix 4404) の OS を介して Smalltalk-80 に移し、一部の情報はユーザと対話しながら知識情報処理を行い、設定した数値入力データを AI ワークステーション上で確認した後、最終的にはホストコンピュータに数値入力データファイルとして転送するものであり、その処理の流れを図 3-20に示す。図中の Phase 1 から Phase 6 は情報の流れではなく、方向性をもった「処理」そのものを意味する。以下、この Phase を中心に各知識フレームとの関連を述べながら数値入力データ設定の流れを説明する。

Phase 1: プログラムフレームの構築

SESS-1 で生成された HDL 記述リストから使用モジュール、結線情報等の生成されたシミュレーションプログラムに関する情報を調べ、プログラムフレーム(ProgramFrame)を作成する。同様に、入力データガイドファイルから数値を設定すべき引数名を調べ、その引数に対応するキーワードをモジュールデータベース(ModuleDataBase)から抜き出しプログラムフレーム(ProgramFrame)に入れる。これらの作業は自動的に行われる。

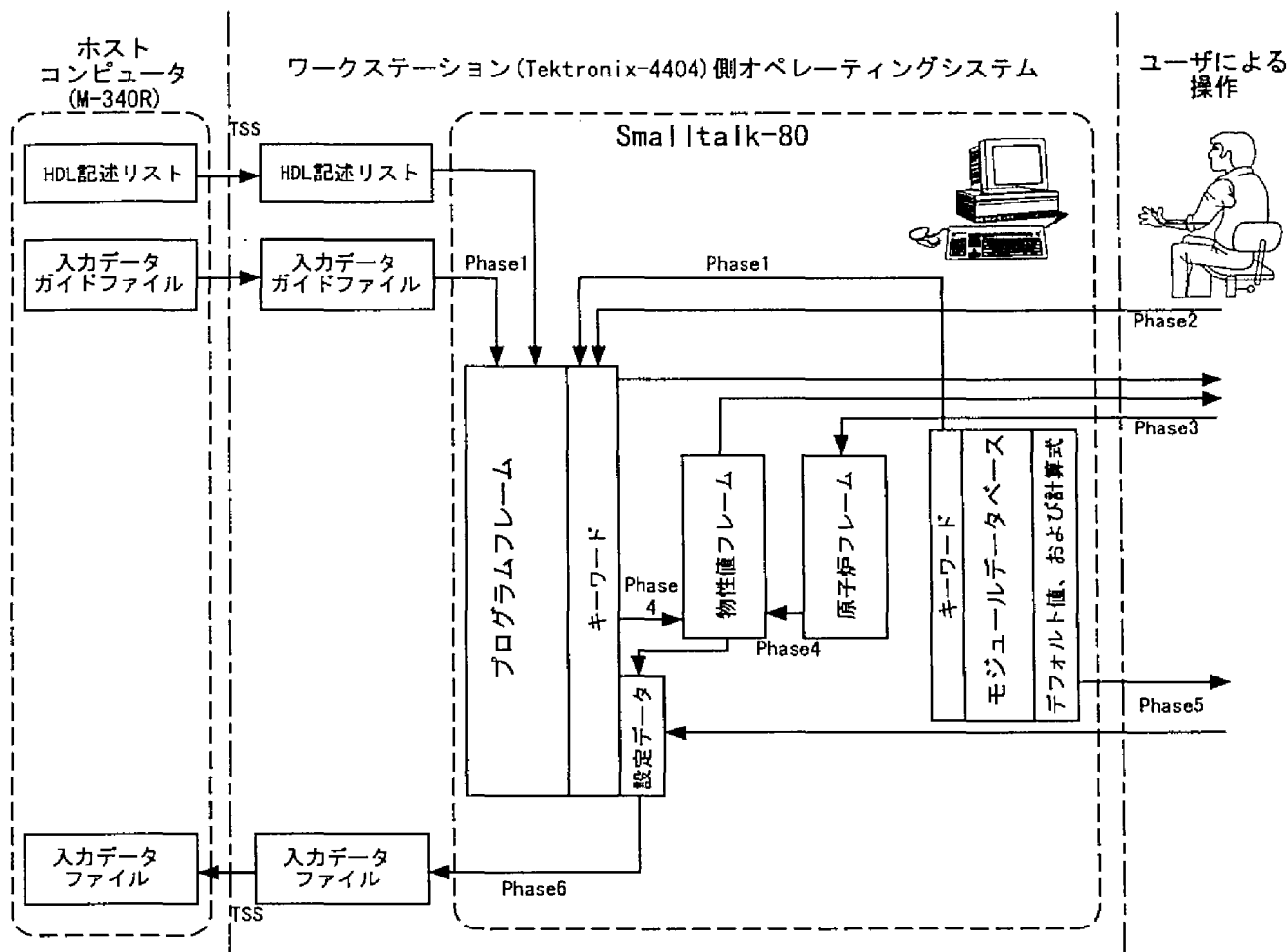


図 3-20 数値入力データ設定支援システムの構成と知識処理の流れ図

Phase 2: プログラムフレーム内のキーワードの変更

Phase 1 で作成されたプログラムフレーム (ProgramFrame) 内のキーワードは、モジュールデータベース (ModuleDataBase) から抜き出されたものであり、数値入力データの自動生成のためにはシミュレーションプログラムに即した変更も場合により必要である。Phase 2 は、このような変更をユーザとの対話により行う部分である。例えば、プラント内のパイプ部分の熱流力を計算するモジュール PIPE を、シミュレーションの対象となる原子炉プラントの 1 次系と 2 次系の双方で使用した場合を考える。このモジュールには、数値入力データの 1 つにパイプ材質の密度が必要であり、この数値に対応する引数のモジュールデータベース (ModuleDataBase) 中のキーワードは、Phase 1 の処理の後までは (PipeStructure Density) となっている。双方のパイプが同じ材質であれば数値入力データを自動設定する際に同じ数値を設定するので問題はないが、材質が異なる場合には同じ数値が設定されると都合が悪いので、例えば 1 次系では PipeStructure₁、2 次系では PipeStructure₂ のように、1 次系と 2 次系でキーワードの第 1 単語を異なるものに変更する。これにより、1 次系と 2 次系ではパイプの材質が異なるものと認識される。Phase 2 では、必要に応じてこのようにキーワードの第 1 単語の変更をシミュレーションプログラムに使用されている各モジュール単位で行う。

Phase 3: 原子炉フレームの構築

原子炉フレーム(ReactorFrame)は、基本的にプログラムフレーム(ProgramFrame)内のキーワードの第1単語と物性値フレーム(PropertyValueFrame)のマーカとの結合関係により構成される。Phase 3の段階で、シミュレーションの対象である原子炉プラントを構成する各構造物の材料などのプラント仕様を知識として入力する。

Phase 4: 数値入力データ自動生成

前述の方法で数値入力データを自動的に設定する。物性値フレーム(PropertyValueFrame)に計算式がある場合にはその計算に必要な値を入力するように要求される。また、テーブルの場合も同様に値を要求し、その値から線形内挿法で数値入力データを決定する。計算やテーブルに使用された値は、原子炉フレーム(ReactorFrame)に登録され、2回目以降の自動生成の際に使用される。このようにして設定された数値は、配列寸法を考慮して調整され、プログラムフレーム(ProgramFrame)内の各引数にある CurrentValue のスロットに代入される。

Phase 5: 自動生成が不可能な入力データの設定

システム内のフレームの知識だけを用いてすべての数値入力データを設定するのは、おそらく不可能である。Phase 5では未設定のデータを自動的に検索し、残ったデータをユーザが作業用ウィンドウを使って数値入力データの設定を行う。入力すべき引数には、いくつかのデフォルト値や計算式が用意されており、それらを利用して数値を設定することも可能である。

Phase 6: 入力データファイルの作成とホストへの転送

ここでは、すべての数値入力データを設定した後に、そのデータを ProgramFrame 内の各引数にある CurrentValue から抜き出し、実行用プログラムが要求する形式で数値入力データを入力データファイルに自動的に書き出す。

Phase 7: 設定されたデータの保存

シミュレーションプログラムを用いて原子力プラントを解析する場合には、数値入力データの一部だけを変更して再実行することが多いので、設定した数値をプログラムフレーム(ProgramFrame)内の各引数にある ValueHistory に保存し、再利用できるようにする。

なお、上述の Phase 1 から Phase 7 にいたるすべてのステップは、初めて数値入力データファイルを作成するときに必要なステップであって、2回目以降のシミュレーション実行時は、Phase 1 を行う必要はなく Phase 2 から Phase 7 までの必要な部分だけを実行すればよい。

SESS-2の基礎となる知識データには、前に述べた物性値フレームや原子炉フレームのように構造化した原子力プラント全般にわたる知識を蓄えておく必要があるが、その情報量は本来膨大なものとなる。本研究では LMFBR に関する知識のうち、一般的な高速炉の炉心構成情報や核的パラメータ、物性値等を中心に知識ベース化している。

今回作成した数値入力データ作成支援を評価するため、試行例として LMFBR プラントの1次系熱流動特性解析を対象とした数値入力データの作成を行った。この試行例では、SESS-1で生成されたプログラムによりシミュレーションを実行するのに必要な2種類の入力データファイルMKDTとRDDTのうち、設定すべきデータ数の多いMKDTへの数値設定を行った。なお、試行に用いたプログラムは6つのモジュール(定常計算用3個、過渡計算用3個)から構成されている。

試行結果を、自動的に設定されたデータ数、作業時間、操作性の3面からまとめると、設定すべき総入力データ数61のうち、Phase 4で自動的に設定されたものは約77%にあたる47個であった。そして残りの14個は定常計算用と過渡計算用モジュールで設定データが重複しているので、ユーザは半分の7個の数値入力データのみを設定するだけでよい。その際に、モジュールデータベースによってデフォルト値や計算式により数値設定が容易に行えるようサポートされているものが4個あり、ユーザが直接数値を入力しなければならないものは結局3個だけであった。また、この一連の設定作業に要した時間をPhaseごとに表3-7に示す。

表 3-7 数値設定支援の試行例における各 Phase の作業時間

Phase	時間 (s)	操作
1	90	自動
2	0	不要
3	50	ユーザとの対話操作
4	70	自動
5	330	ユーザとの対話操作
6	105	自動
計	645 (10min 45s)	

表中の合計時間 10 min 45 s には、各 Phase ごとのプログラムを起動させる時間等の無駄時間が含まれていないが、それを含めても 15 分足らずですべてのデータを設定できた。この一連の作業では、図 3-21 のようなマルチウィンドウを見ながらマウスを用いる操作が多く、キーボードによる入力ほとんど必要なく、そのため操作も迅速である。

図 3-21 の画面では、左上の SystemTranscript ウィンドウに Phase 4 で自動設定された数値入力データが順次表示される。また、画面中央の ManualInput ウィンドウに自動設定ができなかった引数（モジュール名 SNTPR の引数 BETA）のモジュールデータベース中の登録情報を表示している。この場合の数値の設定は toBeInput の部分で数値をキーインするか、あるいは原子炉燃料のタイプとして U(235)、Pu(239)、U(233) のいずれかをマウス選択するか、それらの元素比率をキーインすると自動的に数値を計算するものとなっている。ここで手動設定された BETA 値は原子炉フレームに登録され、以後は自動設定される。

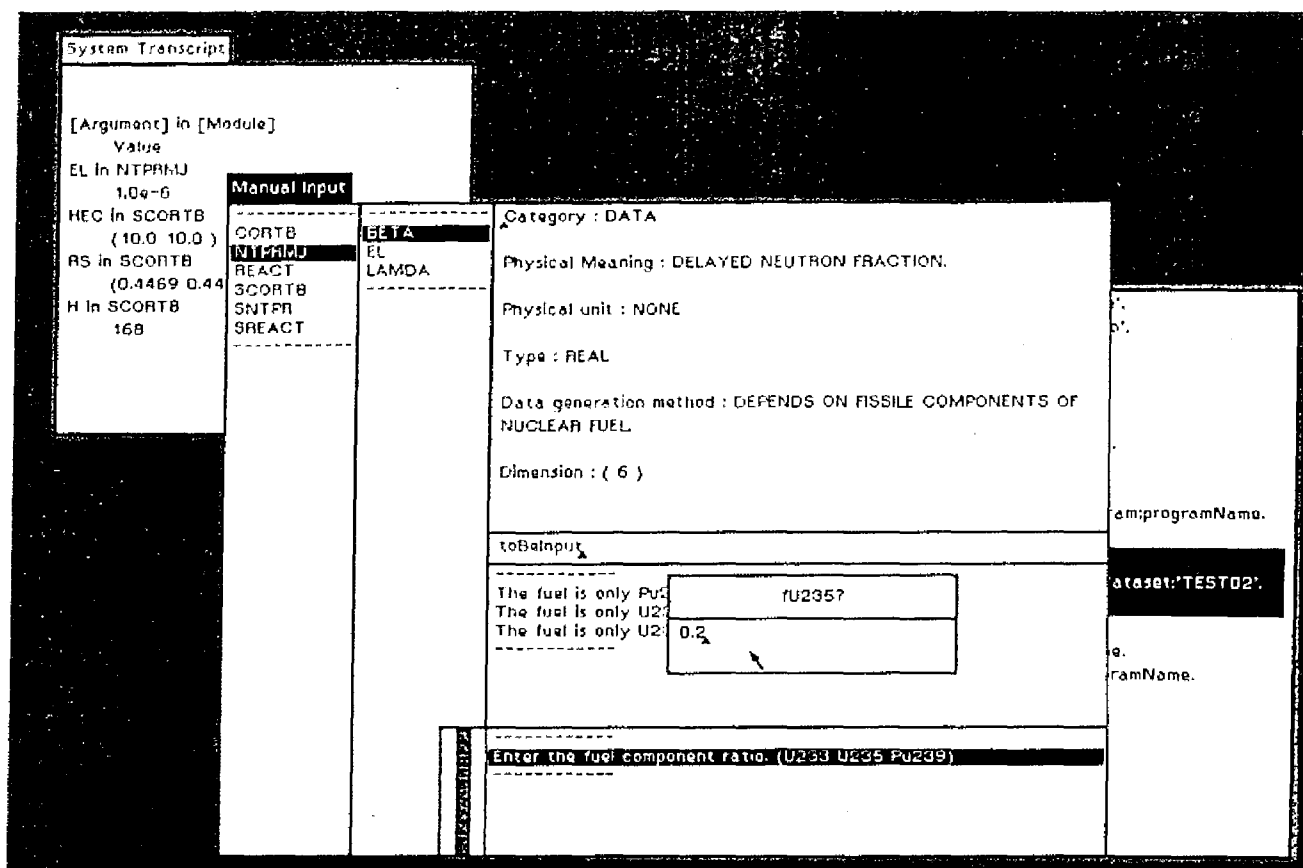


図 3-21 Smalltalk-80 による数値入力データ設定のマルチウィンドウ画面の一例

3.4 まとめ

原子力分野では、現行プラントの安全性のより徹底的な検討や改良、新型炉概念の設計検討に、今後ますますコンピュータによるシミュレーション技術が多用されるものと思われる。本研究では、このようなシミュレーション用ソフトウェア技術の高度化、ソフトウェア生産性の向上の1つの方法としてモジュール統合型シミュレーションシステム MSS を開発し、主にそのヒューマンインタフェースの構築を行った。

3.1 節では、MSS の基本的方法と構成を説明し、さらに、そのヒューマンインタフェースを構築する際のアプローチの方法について述べた。MSS でシミュレーションを行う際には、基本的に(i)シミュレーションプログラムの開発、(ii)シミュレーションの実行の2つの作業が必要である。そこで、これらの作業を円滑に行うために、プログラム開発支援インタフェース SESS-1、およびシミュレーション実行支援インタフェース SESS-2 を構築した。

SESS-1 は、主に MSS によるシミュレーションプログラム開発の人的作業を支援する目的で開発した。プログラム開発時の作業は、主に HDL 記述リストを作成することであるが、開発するプログラムの規模が大きくなるとユーザが直接 HDL 記述リストをキーボードから入力するのは非常に困難である。HDL 記述リストを作成するのは、本来、ユーザが望んでいるシミュレーションプログラム開発という目的には直接関係なく、ユーザにとって本質的な作業ではない。そこで、人間と機械の役割分担を明確にし、コンピュータが機械的な作業を代行して HDL 記述リストを自動生成することで、ユーザはより本質的な作業に集中できるような作業環境を考えた。その際のインタフェースとしては、ユーザがモ

ジュールデータベース管理システム MDMS の操作で獲得しているメンタルモデルを適用して特別な操作説明がなくても使用できるように CRT ベースのインタフェース CRTS を開発した。一方、引数の結線については、開発するプログラムの規模が大きくなると結線数が膨大な量となり、CRTS では結線状況が把握しづらくなる。そのため、カラーグラフィックを用いたヒューマンインタフェース CGKS を考えた。CGKS は、結線状況の提示方法としてユーザが持つ結線のメンタルモデルである「線」をカラーグラフィックにより表示することで、結線状況の直観的理解と確認・修正の直接操作を図った。

SESS-2 は、主に MSS によるシミュレーション実行時の人的作業の支援を目的とした。シミュレーション実行の前には、まず、開発したシミュレーションプログラムに誤りがないかどうか正当性を確認しておかなければならないが、これまでの経験からシミュレーションプログラムの誤りは、主に引数結線の間違いに起因することが多いことがわかっている。そこで、結線の確認作業をできるだけコンピュータで自動化し、疑わしいと診断された結線についてのみユーザが調べるようにすることで負荷の軽減を図った。引数結線の診断は、引数の型だけでなくその単位や意味についても調べる必要があるため、AI 技術を用いて使用モジュールの情報、その引数の情報、プログラムの構成などを知識として構築し、引数の意味論的診断を行った。一方、プログラムの正当性が確認された後、シミュレーションを実行するためには、シミュレーションに必要な数値入力データを用意しなければならない。そこで、上記のプログラムに関する知識だけでなく、各種原子炉材料の物性値や対象とする原子炉プラントの仕様に関する情報を知識として用い、この数値入力データをできるだけ自動的に設定することで、ユーザの負荷軽減を図った。また、この際、自動的に設定できない入力データについても容易に設定できるように計算支援などの機能を設けた。

3.2 節では、このような観点で開発したプログラム開発支援インタフェース SESS-1 の詳細について述べ、続く 3.3 節でシミュレーション実行支援インタフェース SESS-2 の詳細について説明した。さらに、これらの各節では、具体的な試行例として、上記のシステムを用いて LMFBR プラント 1 次系の熱流動特性解析用のプログラムを開発・実行し、有効性を確かめた。

以上、本研究では、モジュール統合型シミュレーションシステムを対象として、ユーザが行う作業を認知工学に基づいた概念やモデルで分析し、その問題点を抽出し、さらに適切なコンピュータ要素技術を用いることによって最適なヒューマンインタフェースの設計方法を検討した。そして、実際にそのヒューマンインタフェースを構築し、具体的な試行例によりその効果を確認した。このような設計方法は、人間の認知情報処理とシステムが取り扱う問題に即したヒューマンインタフェースを構築できるという点で、非常に有効であると考えられる。また、今回は MSS のヒューマンインタフェース構築を対象としたが、他の人間-機械システムにおいても同様の方法が適用できる。

3章 参考文献

- [1] 松本吉弘:「ソフトウェア工学」, 朝倉書店, 1984, p.90.
- [2] 片岡雅憲:「ソフトウェアモデリング」, 日科技連, 1988.
- [3] G.J.Myers, 国友,伊藤訳:「ソフトウェアの複合/構造化設計」, 近代科学社, 1979, pp.57-78.
- [4] 村松健ほか:「過渡現象の実験結果及び計算結果の編集・作画用標準プログラムパッケージ SPLPACK-1 の使用手引」, JAERI-M, 1983, pp.83-166.
- [5] アスキー書籍編集部:「Smalltalk 入門」, アスキー出版局, 1986.
- [6] P.H.Winston, 長尾真, 白井良明訳:「人工知能」, 培風館, 1980.
- [7] 辻井潤一:「知識の表現と利用」, 昭晃堂, 1987.

4章 宇宙用原子炉の概念設計におけるヒューマンインタフェースに関する研究

4.1 宇宙用原子炉の概念設計とそのヒューマンインタフェース構築のアプローチ

複雑な工学システムでは、その設計段階において多大な時間と労力を要する。たとえば、原子炉のような様々な分野の技術を用いる複雑なシステムでは、新しい原子炉の概念を創成してから実際の原子炉として製作に至るまでに、多角的な観点から工学解析を行う必要があり、非常に多くの時間と人員を要する。このような複雑なシステムの設計作業の加速化・省力化といった観点から設計作業を支援する環境の構築が必要と考えられる。

一般に設計においてはその設計概念を実証する「概念設計」の段階と、実際に原子炉を製作するための個々のコンポーネントにいたるまで細部を具体化する「製作設計」の2つの設計段階がある。いずれの設計段階も現実には非常に長い時間と多くの人員が必要である。商用原子炉プラントでは既に原子炉の概念は完成し、製作設計もほぼ標準化されている。しかし、本研究で対象とする宇宙用原子炉は従来とまったく違った目的や構造を有するため、新たに概念設計から始めて実際の製作・完成に至るまでには多大な時間を要することが予想される。なぜなら、このような宇宙炉は過去の設計事例がないため、設計概念が果たして成立するのかが興味のあるところであり、また適切な構成とパラメータ値を選定するための設計自由度が大きく、試行錯誤的な設計検討の回数が必然的に多くなるからである。またこの設計概念が成り立つか否かは、モデルに基づく解析計算を通じて確認しなければならないからである。

本研究では、このような宇宙用原子炉の概念設計を対象として、前章で述べたモジュール統合型シミュレーションシステムと同様に、そのヒューマンインタフェースを設計・構築する。以下、本節では、大規模工学システムの概念設計モデルについて考察し、対象とする宇宙用原子炉とその構成・解析方法などを説明した後、ヒューマンインタフェースを含む概念設計支援環境構築の着眼点について述べる。

4.1.1 大規模工学システムの概念設計モデル

大規模な工学システムの概念設計では、その設計作業段階で各種の知識や情報が必要とされる。ここでは、設計作業に関わる設計情報を整理し、設計過程の概念モデル化を試みた。以下に設計作業に必要な知識を挙げる。

- 設計対象物のサブシステムの構成情報（個々の部品情報とその複合化情報）
- 設計対象物に付与すべき機能情報
- 設計対象物が機能する際に支配する物理法則・動作原理についての知識
- 設計を行う上での全体的な設計目標から個別的な部分目標への展開
- 各々のサブシステムの部分設計目標の達成度を検討評価するための計算手順の明確化

このような知識を組み合わせで行われる設計作業の全体過程をモデル化した結果を図 4-1に示す。図 4-1において、矩形ボックス（・・・解析）は設計作業中に設計概念を実証するために実行される各種工学解析計算を意味し、円筒ブロック（・・・モデル）はそのような工学解析に際して専門家が用いる専門知識を意味する。このようにして表現される全体モデルは個々の要素モデルから構成されるた

めに、モデルの内容の追加や変更に対しても容易に対応できる柔軟性を有している。図 4-1の中で設計作業上重要な部分は、各分野の専門知識モデルの共通要素である基本設計モデルである。これは表 4-1に示すように属性モデリングと設計専門知識ベースとで構成されるものとする。

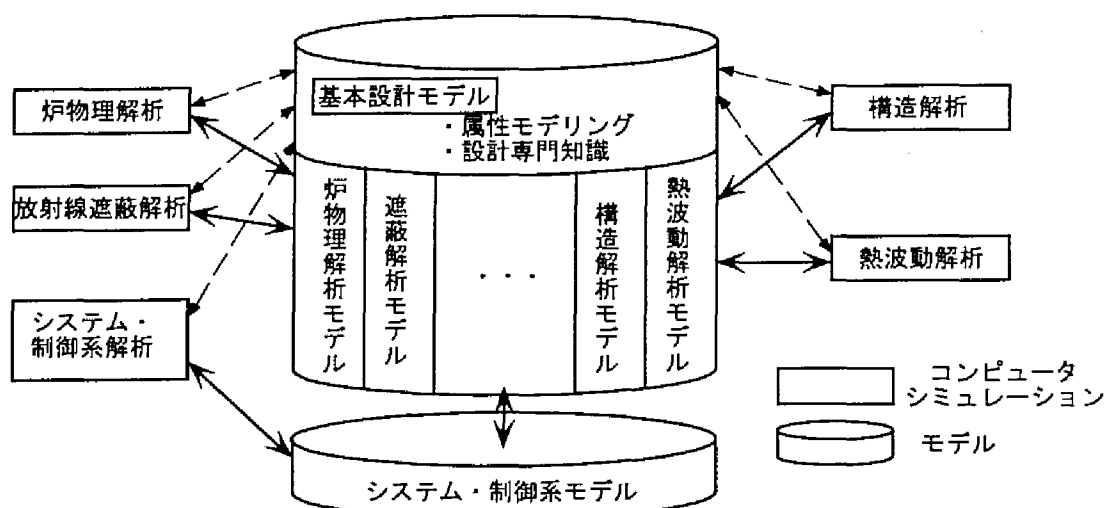


図 4-1 大規模工学システムの概念設計モデル

表 4-1 概念設計における基本設計モデル

設計対象物の属性 モデル	・ 構成部品の階層構造 ・ 基本部品と複合部品の携帯情報・配置情報 ・ 部品の各種属性情報（材料、物性パラメータなど）
	・ 部品の機能情報
設計専門知識 ベース	・ 実体構造と機能構造との対応関係
	・ 全体設計目標の部分目標への階層的展開
	・ 個々の設計目標に対応する機能要求・制約情報と工学解析モデルとの対応 ・ 設計解析を実行するための解析作業に関する知識

次に、概念設計過程で必要とされる設計知識や情報の計算機上での具現化をどのように考えたかについて説明する。宇宙用原子炉の概念設計に関連する設計作業の流れは図 4-1の概念設計モデルによってまとめられる。このうち、特に概念設計モデル中の基本設計モデルが重要な情報と考え、これを概念設計モデル化から得られた設計知識ベースとして構成する。この設計知識ベースを整理し計算機上に具現化するだけでなく、設計者が必要でない知識は隠蔽する。すなわち、設計者から見て重要な知識情報となすべき操作を中心にインタフェースへ組み込むことによって有効な可視化を行う。このような観点から、宇宙用原子炉の概念設計作業の局面や流れに沿って計算機で実現される操作を設計作業支援システムに具現化することで、概念設計作業が一貫して行えるような支援システムの構築を目的として研究を進めた。

4.1.2 宇宙用原子炉

本研究の対象とする宇宙用原子炉は、宇宙ステーション用の電源として用いられることを想定してお

り、JPL(Jet Propulsion Laboratory)が GA Technologies と Martin Marietta Denver Aerospace に研究委託している SP-100 計画^[1]の公開論文の内容をもとに検討している。SP-100 計画は、宇宙ステーション用の電源に原子炉を用いる計画で、特徴として、熱電子発電方式により原子炉の核熱から電力を得ることが挙げられる。

本研究で設計対象としている宇宙用原子炉は以下に示す仕様を満たすことを目標としている。

- 10 年以上の連続運転を可能とすること
- 100 kW 程度の電気出力を達成すること
- できるだけ重量と容積を小さくすること
- 信頼性と安全性を高くすること

この仕様を満足する宇宙用原子炉システムを構成するために、表 4-2 に示すような設計概念が挙げられる。

表 4-2 宇宙用原子炉の設計概念

自律性	宇宙空間での長期運転の持続には完全に自律性を有した自動運転機能が必要である
直接熱電変換	蒸気タービンやガスタービンを用いる従来の発電方式では機器構成が複雑化し大型になる
受動概念	ポンプやタービンのような可動機器が入ると宇宙ステーションの姿勢制御が難しく信頼性が低下するため、受動機器だけを用いてシステム構成を単純なものにする

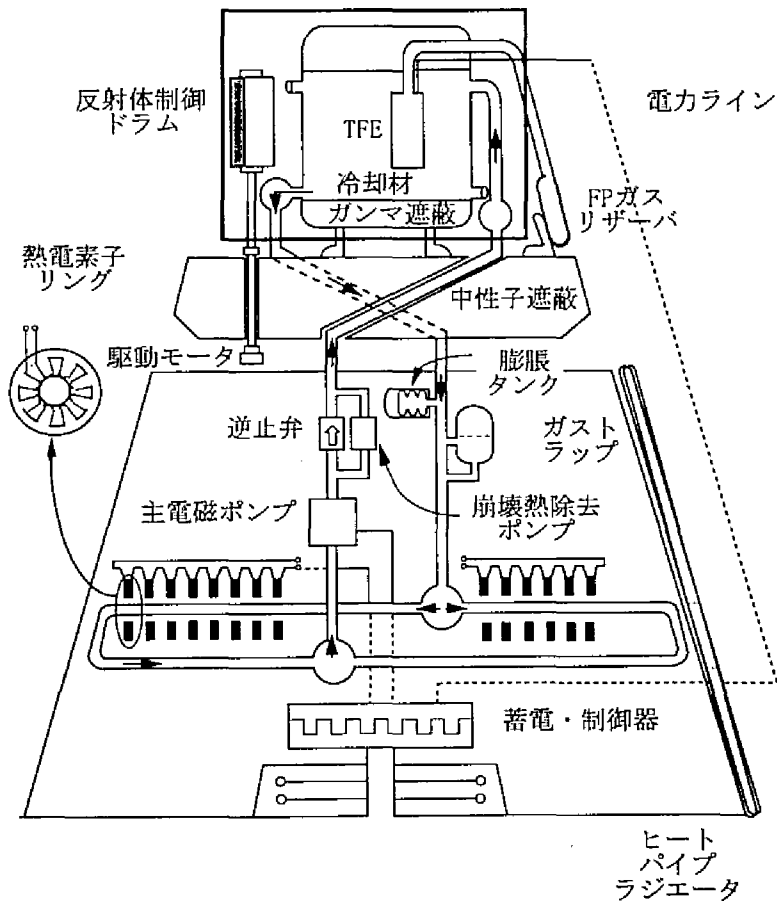


図 4-2 宇宙用原子炉全体システムの概念図

この設計概念を具体化した宇宙用原子炉の全体システムとしては図 4-2 のような構成を考えた。本研究では対象を更に絞り、図 4-2 の上部部分すなわち図 4-3 に示す宇宙用原子炉の炉心部分を設計対象とする。

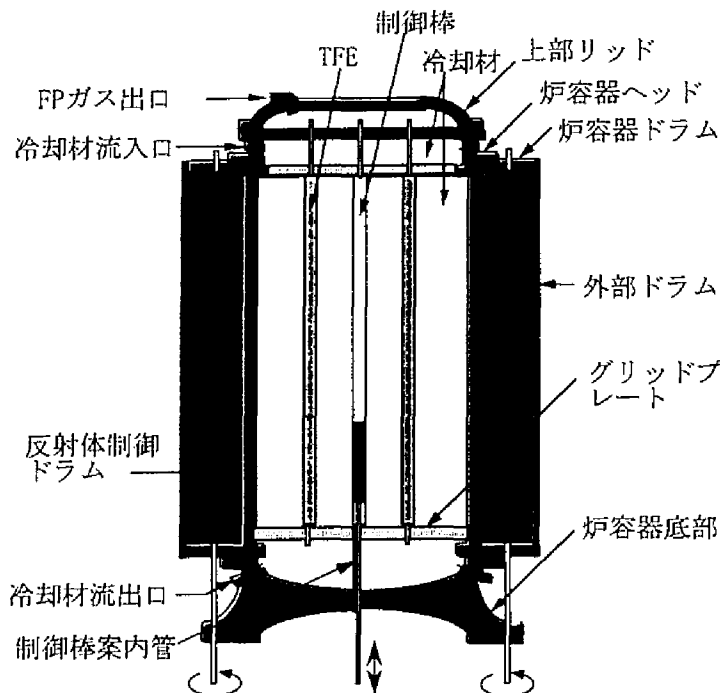


図 4-3 宇宙用原子炉の炉心部

以下に、考案した宇宙用原子炉の炉心の設計案を述べる。

核燃料ペレットには 95% の高濃縮ウランを用いて炉心の小型化を図る。また、核燃料の高温熱から熱電子発電により直流の取り出しを図るために、熱電子発電素子として燃料ペレットの外側にエミッタ・コレクタ等を取りつけた構造の TFE (Thermo-ionic Fuel Element) セルを用いることにした。図 4-4 は TFE ピンの構成の概念図である。実際のところ、TFE ピンは TFE セルを縦に 6 つ積み重ねられて作られる。TFE セルは図 4-4 右上に示すように核燃料ペレット・エミッタ・コレクタからなり、直流の取出し方は、円周方向に 8 分割し、その 4 素子ずつを並列につなぎ、更に 2 つの並列回路を並列にして軸方向に直列化している。発電素子の並列化により、TFE の一部が機能劣化しても直ちに全体の発電機能は劣化せず、信頼性が向上する。

図 4-5 は、TFE セルの 1/8 の円周方向の構成図である。中心部分は、燃料が溶融してしまうのを防ぐために、空孔のある UO_2 または UN の燃料ペレットが入る。その外側には発電効率向上のために、熱電子放出体のタングステン(W)をエミッタとして燃料に直接取りつけている。その外側には、ギャップを隔ててエミッタより仕事関数が低く蒸気圧が低い物質としてニオブ(Nb)をコレクタとして取りつけている。このギャップには、空間電荷効果による発電効率低下を防ぐためセシウムガス(Cs)を封入する。その外側は冷却材の過度の温度上昇を避けるためギャップを設け、その外側に耐熱合金である Nb-1%Zr でシースを形成する。TFE セルの構成は以上である。この TFE セルからなる各 TFE ピン同士の隙間には冷却材が流れる。図 4-5 の右端は炉心全体の冷却材の流れる面積を 1 セル当たりに換算した半径(流路等価半径)である。冷却材には液体金属の使用により伝熱性能の向上・炉心の小型化・炉心の高温化(発電効率の向上)を狙っている。この候補としては NaK・Na・Li を考えている。

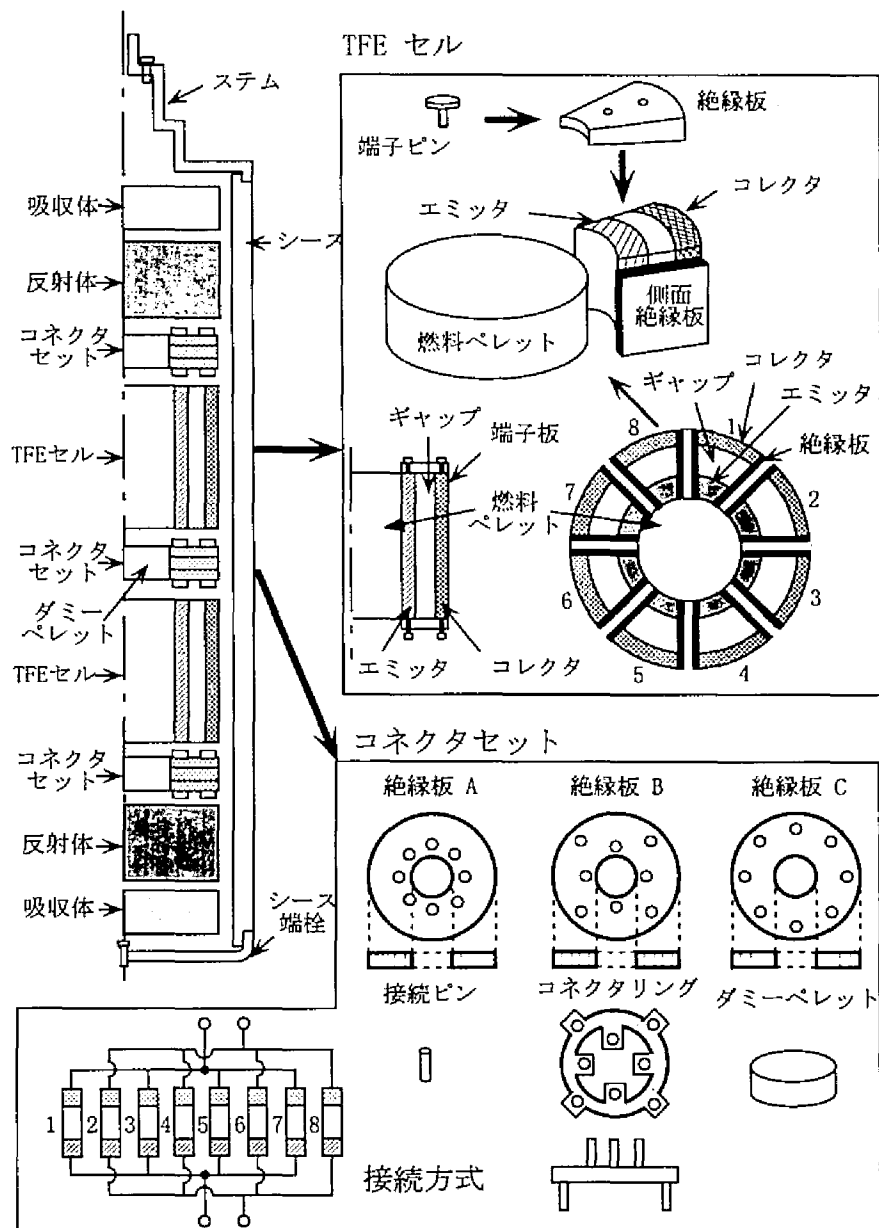


図 4-4 TFE ピン構成の概念図

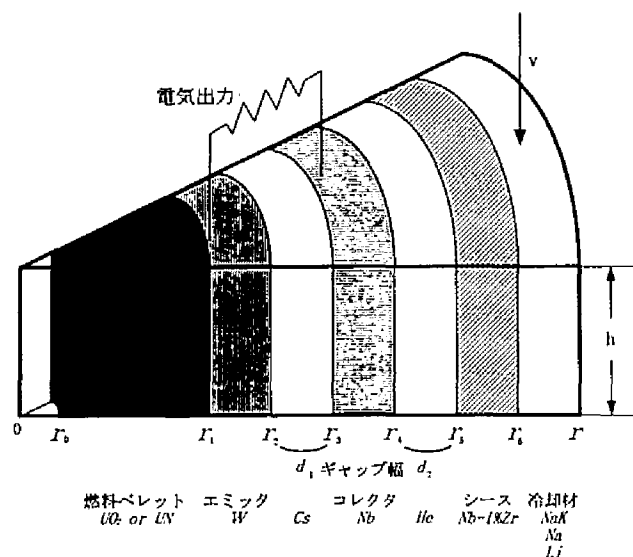


図 4-5 1/8 円周の TFE セル構成の概念図

燃焼に伴う反応度減損を補償するシム制御及び原子炉の起動停止・制御を行うためには回転制御ドラムを用いる。回転制御ドラムは、図 4-6 上部のように、炉心の外側に円周に沿って十数個設置されるもので、円筒の一部の角度 θ の扇形の円周の部分の中性子吸収体にし、残りの部分を反射体にしたものである。吸収体を外側あるいは内側に向けることで原子炉の反応度を制御する。吸収体には炭化ホウ素 BC を、反射体には酸化ベリリウム(BeO)を用いている。

回転ドラムの設計パラメータ

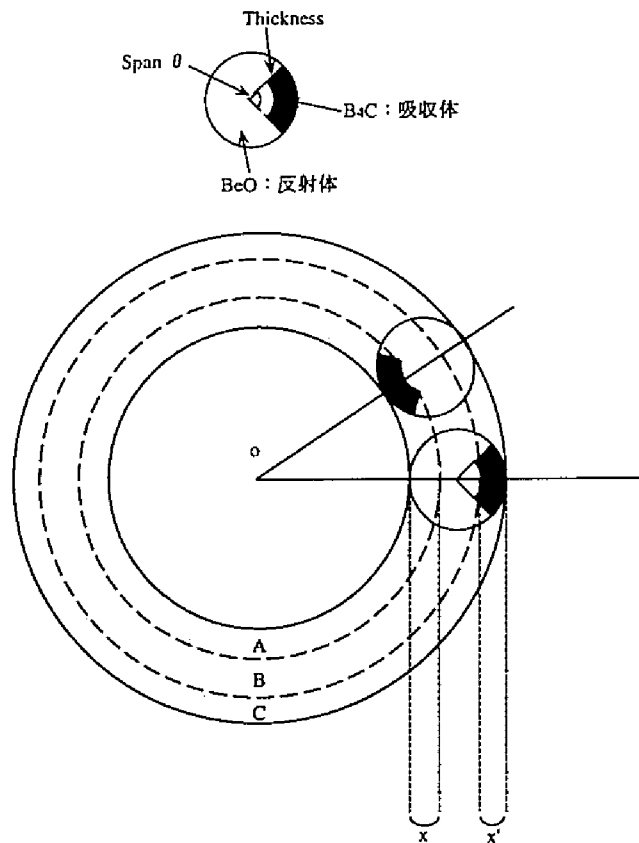


図 4-6 回転制御ドラムの構成

4.1.3 設計のための解析計算

4.1.3.1 熱電子発電・伝熱特性計算

熱電子発電・伝熱特性計算（以下、TFE 計算）とは、TFE セル内において、熱電子発電方式を発電原理として解析計算を行い、6 つの TFE セルから構成される TFE ピン 1 本から得られる発電効率と各 TFE セル内での伝熱特性を求めるものである。すなわち TFE 計算の目的は 2 つあり、第一に、原子炉炉心内で発生した熱出力がどの程度の電力に変換できるのかを調べることと、第二に、伝熱特性解析を通して、燃料中心温度・冷却材出力温度がそれぞれ燃料融点・冷却材沸点を越えていないかどうかという熱的制約条件を調べることである。

熱電子発電は、高温の金属表面から熱電子が放出される現象(熱電子放出効果)を利用して熱エネルギーを電気エネルギーに直接変換する発電方式である。図 4-7 に熱電子発電効果のモデル図を示す。

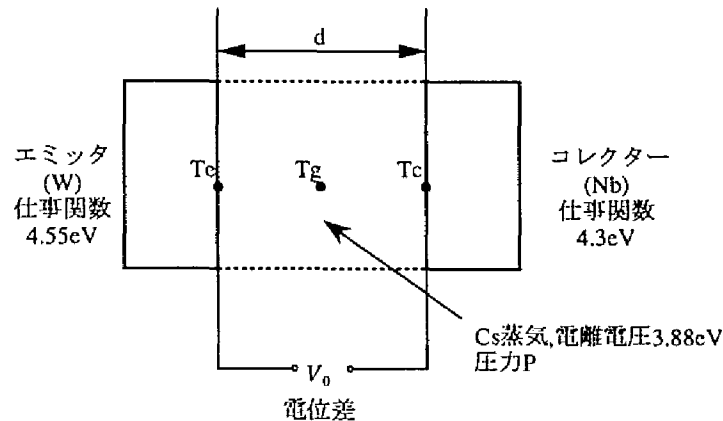


図 4-7 エミッタとコレクタ間の熱電子発電効果のモデル図

TFE 計算プログラムでは、エミッタとコレクタの仕事関数からエミッタでの単位表面当たりの放出電流を計算する。電気出力はこの放出電流と熱出力値から得られる。この炉心全体の電気出力を熱出力で割ったものが発電効率となる。また、発電効率に影響を与えるエミッタ温度を求めるため、同時に TFE セル中での核熱によりもたらされる伝熱特性計算を行っている(付録 B 参照)。

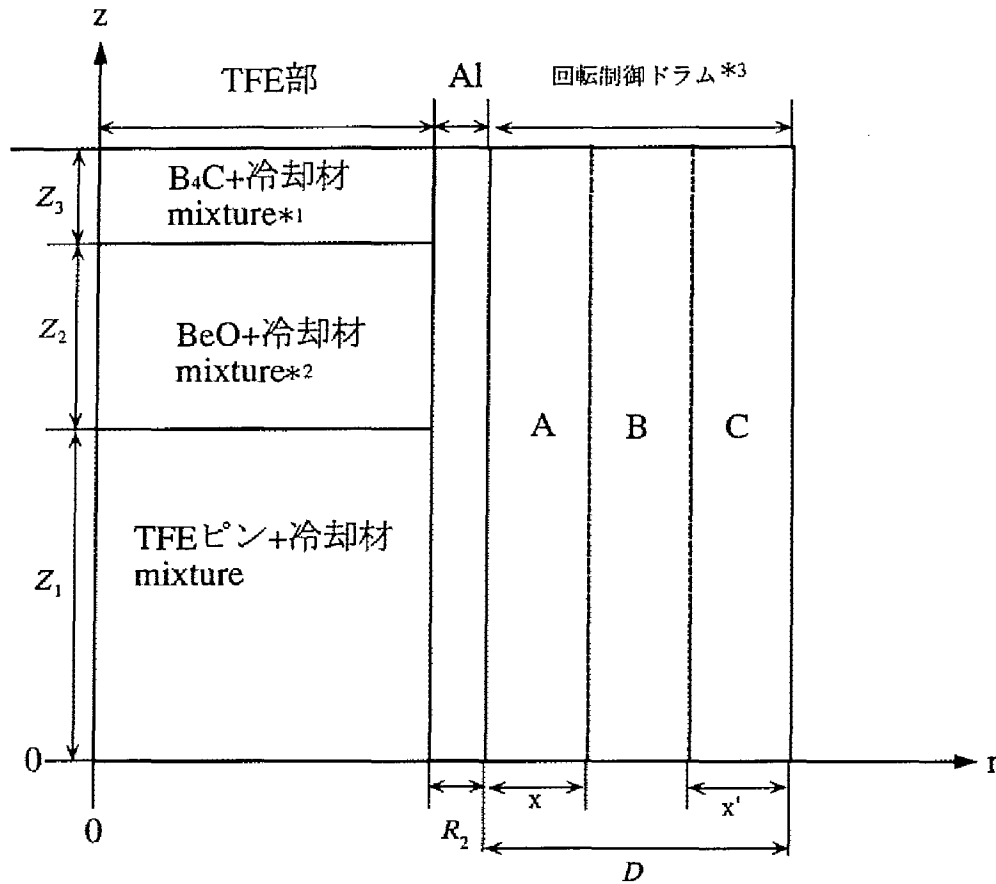
TFE 計算プログラムの入力として必要なものを表 4-3 に示す。

表 4-3 TFE 計算に必要なパラメータ

<i>coolant</i>	冷却材の種類
<i>fuel</i>	燃料の種類
<i>hole</i>	燃料の中心空孔の有無
<i>n</i>	TFE セル列数 [列]
<i>r0</i>	中心空孔の半径 [cm]
<i>r1</i>	燃料外径 [cm]
<i>r2</i>	エミッタ外径 [cm]
<i>r3</i>	コレクタ内径 [cm]
<i>r4</i>	コレクタ外径 [cm]
<i>r5</i>	シース内径 [cm]
<i>r6</i>	シース外径 [cm]
<i>h</i>	TFE セルの高さ [cm]
<i>v</i>	冷却材流速 [m/s]
<i>Tin</i>	冷却材入口温度 [K]
<i>p1</i>	外側から 1 番目のセルの熱出力密度 [W/cc]
<i>p2</i>	外側から 2 番目のセルの熱出力密度 [W/cc]
<i>p3</i>	外側から 3 番目のセルの熱出力密度 [W/cc]

TFE セルの寸法(燃料中心孔の半径 r_0 ・燃料外径 r_1 ・エミッタ外径 r_2 ・コレクタ内径 r_3 ・コレクタ外径 r_4 ・シース内径 r_5 ・シース外径 r_6)は図 4-5 に示す通りである。TFE セルの高さ h は、図 4-8 に

示す炉心燃料部の高さ Z_1 の 3 分の 1 の値である。熱出力密度は、後述の炉心核計算によって得られた炉心内の熱出力密度分布の値から、TFE セルの位置に内挿して求めている。また、実際の計算に必要な冷却材等価流路半径 r は TFE ピンの列数 n とシース外径 r_0 から計算を行う。



注1: *1、*2 は現在、 B_4C 、 BeO のみとして計算
(本当は冷却材とのmixture)

注2: *3 の回転制御ドラム部の常数は、回転制御ドラムの吸収
体部が内側か外側かで変更

図 4-8 炉心 r - z 2次元拡散系の体系

4.1.3.2 炉心核計算

宇宙用原子炉の炉心核計算を行うためには、日本原子力研究所で開発された SRAC コードを用いた [2][3]。

宇宙用原子炉の炉心内燃料ペレットの材料として減速材が混入しない濃縮ウランを用いているため、基本的には炉心の中性子スペクトルは高速領域が支配的であるはずである。しかし、本研究で熱中性子炉設計用の SRAC コードを用いた理由は、炉心外側の上下を取り囲む BeO を用いる反射体と円周上に並ぶ回転反射体があり、ここでの減速過程が核計算に大きく影響するためである。

この炉心核計算での目的は 2 つある。まず第一に、設計目標である 10 年間燃料交換をせずに原子炉を制御するための条件を規定することである。反応度制御の上では、全ての回転制御ドラムの内側を反射体に外側を吸収体にした時が最大反応度となり、その配置を逆にした時が最小反応度となる。最大反応度と最小反応度の差が 10 年間の燃料燃焼による反応度減損をカバーし、加えて安全性の上から原子

炉緊急停止制御余裕の確認をも含む必要がある。第二の目的は、TFE セル内での伝熱特性計算のための炉心の熱出力密度分布を求めることである。

SRAC コードは、中性子断面積ライブラリとそのための処理コード、種々の輸送計算コード(PIJ・ANISN・TWOTRAN)、拡散計算コード(TUD・CITATION)、セル燃焼計算コード、その他の補助コード(炉心燃焼計算コード COREBN など)からなり、原子炉の設計と解析に使用される。そのうち本研究では、中性子断面積ライブラリを用いてセル燃焼計算を行い、その結果を用いて拡散計算(CITATION)を行うことにした。

炉心核計算は大きく分けて以下の 3 ステップで行われる。

1. セル燃焼計算： TFE 等価 1 チャンネル分の均質化炉常数を求める。
2. 回転制御ドラムマクロ計算： 回転制御ドラム部の炉常数の計算を行う。
3. 炉心燃焼計算(CITATION 計算)： 上の 2 つの計算結果を用いて原子炉炉心の 2 次元中性子拡散計算を行う。炉心燃焼計算は 3 年間を 1 ステップとして、運転初期・3 年後・6 年後・9 年後・12 年後の 5 ステップ分を行い、計算結果のうち運転初期と 10 年を越える 4 サイクル目に注目した。

以下にそれぞれの計算の取り扱いについて概略を述べる。セル燃焼計算は原子炉出力レベルによって様相が変わる。原子炉出力が大きければよく燃える、すなわち燃料燃焼による反応度減損が大きくなり、小さければあまり燃えず反応度減損も少ない。従って、原子炉出力レベルは 10 年間の連続運転が可能か否かを調べる核計算上重要な入力データである。ただし宇宙用原子炉の設計仕様は、原子炉の出力ではなく、TFE セルによる発電の電気出力が 100kW になることである。そのため、発電効率の変化により原子炉出力レベルを変化させなければならない。仮に発電効率を η とすると、電気出力 100kW を得るための原子炉出力レベルは $100\text{kW}/\eta$ で与えられることになる。

回転制御ドラム部分の取扱いは、図 4-6 下部のように考える。回転制御ドラムを A・B・C の 3 つの領域に分け、A 部分と C 部分の厚さの円筒が同じ体積になるように A 部分と C 部分の厚さ x 、 x' を決める。これは、回転制御ドラムの吸収体が内側または外側を向いている時、A 部分と C 部分の材質の常数を変えるだけで厚さを変えずに計算を行うためである。

CITATION 計算の体系は、図 4-8 のような r - z 2 次元の円筒体系とする。表 4-4 に、SRAC に必要なパラメータを示す。

このうち、セル燃焼計算においては、TFE セルの寸法・燃料の中心孔の有無 *hole*・冷却材の種類 *coolant*・燃料の種類 *fuel*・TFE 計算から求められる発電効率 η が使われる。回転制御ドラム部分のマクロ計算においては、回転制御ドラムの直径 D が使われる。CITATION 計算においては、燃料部の高さ Z_1 、ベッセルドラムの厚み R_2 、炉心部上下部の反射体の厚み Z_2 、その外側の吸収体の厚み Z_3 が使われる。

表 4-4 SRACに必要なパラメータ

<i>coolant</i>	冷却材の種類
<i>fuel</i>	燃料の種類
<i>hole</i>	燃料の中心空孔の有無
<i>n</i>	TFE セル列数 [列]
<i>r₀</i>	中心空孔の半径 [cm]
<i>r₁</i>	燃料外径 [cm]
<i>r₂</i>	エミッタ外径 [cm]
<i>r₃</i>	コレクタ内径 [cm]
<i>r₄</i>	コレクタ外径 [cm]
<i>r₅</i>	シース内径 [cm]
<i>r₆</i>	シース外径 [cm]
<i>R₂</i>	ベッセルドラムの厚み [cm]
<i>D</i>	回転制御ドラムの直径 [cm]
<i>Z₁</i>	燃料部高さの半分 [cm]
<i>Z₂</i>	上部反射体の厚み [cm]
<i>Z₃</i>	上部吸収体の厚み [cm]
<i>η</i>	熱電子発電の発電効率

4.1.3.3 複合収束計算

宇宙用原子炉の概念設計のための解析計算には、前述のように設計専門分野の違いから TFE セルによる熱電子発電・伝熱特性計算と SRAC による炉心核計算とがある。TFE 計算の入力条件には SRAC からの出力である熱出力密度分布が必要であり、SRAC の入力条件には TFE 計算で求めた炉心内平均発電効率が必要である。すなわち、両者には互いにフィードバック関係があり、その関係を整理すると図 4-9 のようになる。

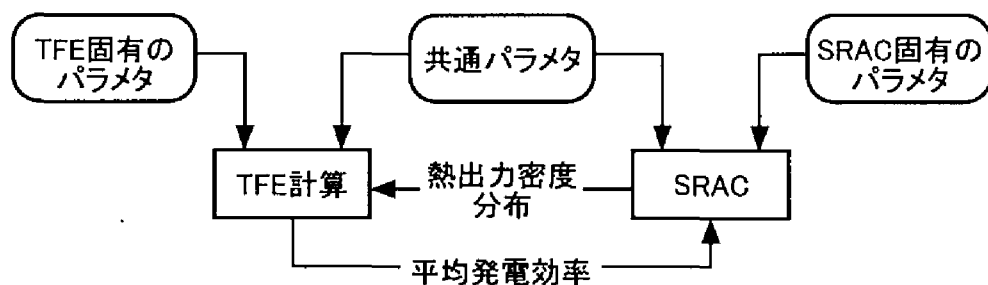


図 4-9 TFE 計算と SRAC との関係

複合される計算に必要なパラメータは、TFE 計算固有のパラメータと SRAC 固有のパラメータ、それぞれに共通のパラメータ、発熱分布、平均発電効率の 5 種類に分けることができる。TFE 計算に必要な入力パラメータは TFE 計算に固有のパラメータと共通のパラメータ及び SRAC の出力から求まる

発熱分布の3種類である。一方、SRACに必要なパラメータはSRACに固有のパラメータと共通のパラメータ及びTFE計算からの出力である平均発電効率の3種類である。設計案を決定する場合には、TFE計算とSRACの相互の入力であり出力でもある発熱分布と平均発電効率の両方の値を満足するような組を探さなければならない。この時、発熱分布は空間的に分布しており多数の値が存在するため、ある特定の1つの値に決定することは難しい。そこで、炉心全体の平均発電効率をある範囲で動かしてまずSRACを実行し、次いでTFE計算を経て出てきた値が最初に入力した値と同じになるような平均発電効率の値を探索することとした。具体的には、図4-9中のSRACで発電効率の入力部分のループを開き、ここに仮の平均発電効率 η_0 の値を与えてSRACを実行し、TFE計算を経て求められた値 η_1 と比べ、 η_1 が η_0 に一致しなければ η_0 を η_1 に入れ替えて計算し、 η が収束するまで計算を行う。図4-10に収束手法を用いた解析計算全体の流れ図を示す。

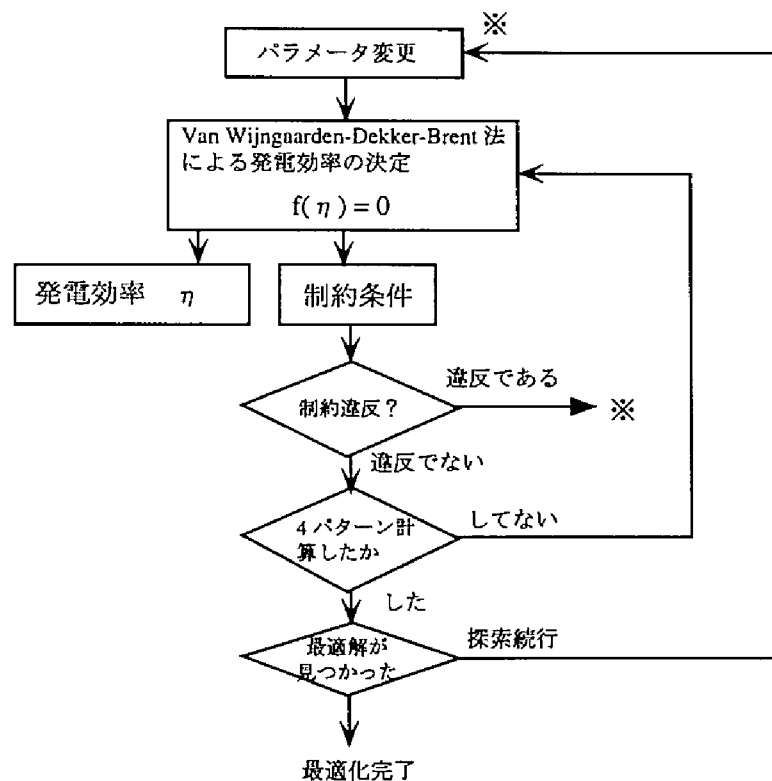


図 4-10 複合収束計算全体の流れ

図4-10において $f(\eta)$ は、図4-11に示すような $g(\eta_0) - \eta_0$ で与えられる関数である。ここで、平均発電効率 η_0 を入力とし、SRACからTFE計算に至る複合計算の結果である発電効率 η_1 を求める関数を $g(\eta_0)$ とした。

次に、全ての計算に共通な入力ファイルの作成法と計算実行法について述べる。TFE計算とSRACは、それぞれ本研究の設計支援システムとは別に開発されたものである。よって、それらのプログラムに適した入力ファイルを作成し、構築したシステムから外部のプログラムを起動するというインタフェースが必要になる。設計パラメータを蓄えたファイルから入力ファイルの作成はPerl言語を用いて行うことにする。

このようなインタフェースを用いて、複合計算前後の平均発電効率の差を求める関数 $f(\eta)$ を説明する。この際に必要なパラメータは表4-5に示す通りである。

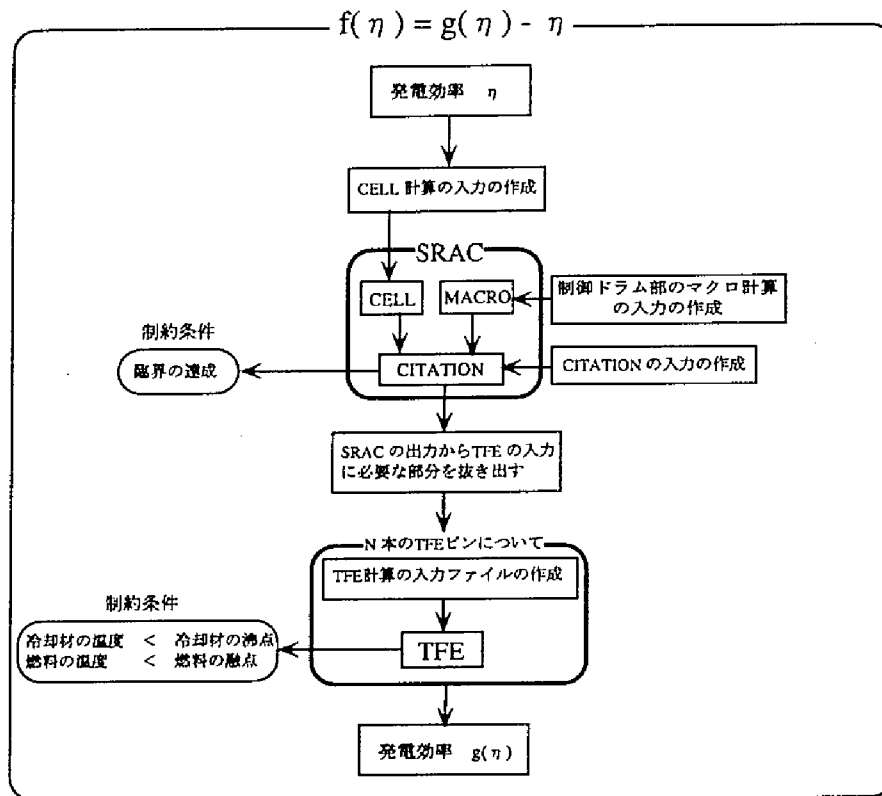


図 4-11 収束計算のための関数の詳細

表 4-5 複合計算に必要なパラメータ

<i>coolant</i>	冷却材の種類
<i>fuel</i>	燃料の種類
<i>hole</i>	燃料の中心空孔の有無
<i>power</i>	目標とする電気出力 [kW]
<i>n</i>	TFE セル列数 [列]
<i>r₀</i>	中心空孔の半径 [cm]
<i>r₁</i>	燃料外径 [cm]
<i>r₂</i>	エミッタ外径 [cm]
<i>r₃</i>	コレクタ内径 [cm]
<i>r₄</i>	コレクタ外径 [cm]
<i>r₅</i>	シース内径 [cm]
<i>r₆</i>	シース外径 [cm]
<i>v</i>	冷却材流速 [m/s]
<i>T_{in}</i>	冷却材入口温度 [K]
<i>R₂</i>	ベッセルドラムの厚み [cm]
<i>D</i>	回転制御ドラムの直径 [cm]
<i>Z₁</i>	燃料部高さの半分 [cm]
<i>Z₂</i>	上部反射体の厚み [cm]
<i>Z₃</i>	上部吸収体の厚み [cm]

図 4-11において、初期値として平均発電効率 η を入力すると、まず SRAC に関するパラメータと共通のパラメータ及び η の値を用いてセル燃焼計算の入力ファイルの作成を行い、その入力ファイルを用いてセル燃焼計算を行う。またこれと並行して、回転制御ドラムマクロ計算のための入力ファイル作成、およびそのマクロ計算を行う。セル燃焼計算とマクロ計算により求めた均質化炉常数を用いて CITATION 計算の入力ファイルを作成し、CITATION 計算を行う。SRAC による炉心核計算は以上である。次に TFE ピンにおける熱電子発電・伝熱特性計算を行う。CITATION 計算によって求めた炉心内 r - z 熱出力密度分布より、TFE ピンの位置における熱出力密度の値を求める。先に述べた通り TFE 計算に関するパラメータと共通のパラメータ及び SRAC からの熱出力密度分布を用いて TFE 計算に関する入力ファイルを生成し、ついで TFE 計算を行う。この際炉心内に存在するすべての TFE ピンについて電気出力を求めその和を熱出力の和で割ると発電効率 $g(\eta)$ が求まる。

一連の計算の中で満足されなければならない制約条件として、SRAC の CITATION 計算からは原子炉実効増倍率 $k_{effective}$ の値を評価して原子炉が臨界に達するかどうか、また、TFE 計算からは冷却材の温度分布と燃料の温度分布が求まるので、冷却材温度が沸点を越えないかどうか、燃料温度が融点を越えないかどうかという条件が挙げられる。

4.1.4 解析計算の結果

前項で述べた解析計算は、各分野の専門的な観点から様々な目的に応じて実行されるために結果に対して特定の評価を下すことはできない。ここでは計算の目的を限定しそれに基づいた計算を実行した。計算目的として、TFE 計算については平均発電効率を大きくするもの、SRAC については実効増倍率を大きくするものに設定した。ここで、平均発電効率が高いということは、100kW の電気出力という設計仕様を満足しながら原子炉の容積を小さくするために必要なことである。一方、実効増倍率が高いということは、原子炉が臨界に達する余裕があること、つまり更に燃料を減らすことで原子炉を小さくできる可能性があることを示している。

なお、ここでの解析計算の結果は、後で述べる支援環境構築の際に、設計知識として利用する。

TFE 計算

TFE 計算を行った結果、平均発電効率を高くするために得られた知識をまとめて表 4-6 に示し、以下に説明を補足する。燃料ペレットの種類については、UNの方が UO_2 に比べて燃料中心温度を低く保つことができ、燃料溶融に関する制約条件に違反しにくいいため、UN を選定することが適切と考えられる。冷却材の種類について、Li は他の材質に比べて沸点が高いため、冷却材沸騰に関する制約条件を満たすための冷却材入口温度の入力パラメータを高く設定することができ、結果的に平均発電効率が増大となった。TFE セルの半径寸法については計算理論上の知識であり、TFE セルの製作が可能となる寸法は機械・材料設計の専門家に意見を求める必要がある。TFE セルの半径のうちで特に平均発電効率に大きく影響を与えるのは燃料の量とエミッタ幅、コレクターシース間のギャップ幅である。

表 4-6 TFE 計算から得られた最適設計知識

材質	
燃料ペレット	種類による変化は見られない
冷却材	Li に選定する
冷却材入口温度	高くする
冷却材流速	低くする
TFE セルの半径	
燃料ペレット	量を増やす
エミッタ幅	小さくする
エミッターコレクタ間の ギャップ	熱出力密度分布の変化によって 0.3mm から 0.4mm までピークが変化した
コレクタ幅	小さくする
コレクターシース間のギャップ	大きくする
シース幅	小さくする

SRAC

一方、SRAC を実行した結果から得られた知識として、平均発電効率を一定とした場合に実効増倍率を大きくするには、燃料ペレットとして UN を用い、冷却材として Li を用いることが有効であることが挙げられる。実際の計算においては実効増倍率を大きくすることだけが目的ではなく、初期状態と 10 年以上経た状態であっても回転制御ドラムによる制御が可能になる必要がある。また、回転制御ドラムの向きによって炉心内の熱出力密度分布は大きく変化するが、全体としての熱出力密度分布の平均値は、初期状態/12 年後の状態と回転制御ドラムの向きによらず一定であることもわかった。

複合収束計算

複合収束計算を実行した結果、定性的にわかったことは、設計仕様の電気出力を決定した時点で、炉心の大きさに応じて熱出力と平均発電効率の関係が決まるということである。例えば、TFE セルの寸法を変更せずに TFE ピンの本数だけ変更して炉心サイズを大きくすれば、燃料ペレットが増加し全体としての熱出力は大きくなる分、TFE 1 本当たりの平均発電効率は小さい値に収束することになる。また、炉心全体としての熱出力密度分布の平均値が一定であっても、TFE ピン 1 本当たりの発電効率は、炉心内での位置に応じた熱出力密度分布を入力として TFE 計算により求められるので、それぞれ異なることがわかった。

4.1.5 ヒューマンインタフェース設計上の着眼点

本研究では、前述のような宇宙用原子炉の概念設計を対象として、その作業に対するヒューマンインタフェースを実現し、統合的な支援システムの構築を目指す。この課題においては、未だ存在しない新しい概念によって作動する宇宙用原子炉の概念設計を行い、その設計を計算機シミュレーションによって実証する必要がある。その作業の際には、対象とする宇宙用原子炉の部品構成・機能構成を理解し、さらに各種属性パラメータを設定し、それに対する特性を解析計算により確認しなければならない。こ

れら一連の作業を円滑に行うためには、現実には存在しない原子炉の形状・部品構成・機能構成をわかりやすく提示し、さらに解析計算の際には、操作しやすいインタフェース環境が必要である。このような“Reality”と操作性を実現するために、VR 技術を用いた概念設計支援環境 VINDS(Virtual environment for INtegrated Design Support)を開発する。

一方、原子炉プラントに代表される大規模システムの概念設計では、異なる専門分野の技術者が設計作業を分担して協同で作業を進める場合も多い。また、複数の技術者がいつも一ヶ所に集まって設計作業を行うわけではなく、遠隔地に分散している場合もある。そのため、協同作業過程では、異なる専門の技術者間で意志の疎通を欠いたり、連絡の齟齬で意図が誤って伝えられたり、誤解が基で誤った情報に基づいて作業が進められるなど、ヒューマンエラーがつきものである。設計作業をこのような協同作業という観点でとらえ、協同設計作業過程でつきもののヒューマンエラーを防止して見通しの良い設計作業を行い、設計の信頼性向上、設計作業の時間短縮とその効率化をはかるために、VINDS を発展させ、CSCW 技術を用いてコンピュータネットワークに基づく非同期分散型協同設計支援環境 WINDS(WWW-base INtegrated Design Support system)を開発する。以下では、2.2 節で述べた認知工学を応用して、これら VINDS と WINDS のヒューマンインタフェースを含む支援環境を設計する上でのアプローチについて述べる。

4.1.5.1 仮想現実感を応用した概念設計支援環境 VINDS 構築のアプローチ

宇宙用原子炉の概念設計段階における人的作業を分類してみると大別して以下のようなものがある。

- 形状・部品構成・機能構成といった宇宙用原子炉の概念設計モデルの理解
- 各種パラメータの設定と計算機シミュレーションによる動作の検証

ここでは、表 4-7 に示すように、これらの作業における問題点を抽出し、その問題点に対して認知工学の概念を用いて分析・解決方法を検討し、これを実現するためのコンピュータ技術について述べる。

表 4-7 仮想空間を応用した概念設計支援環境 VINDS 構築のアプローチ

作 業	問題点	認知工学の概念	コンピュータ技術
宇宙用原子炉の概念設計モデルの理解	未だ存在しない宇宙用原子炉の概念設計モデルを理解するのが困難	・メンタルモデル ・機能の階層的表現 ・納得世界の構造 ・実行の淵と評価の淵	AI 技術 VR 技術
計算機シミュレーションによる検証	各種パラメータの設定・シミュレーションの実行・結果の評価が煩雑	・実行の淵と評価の淵	AI 技術 VR 技術

まず、概念設計作業の最初の段階として、対象とする宇宙用原子炉の概念設計モデルを構築し理解する必要がある。この際の問題点としては、新しい概念によって動作する宇宙用原子炉が存在しないため、その概念設計モデルを理解するのが困難であることが挙げられる。これは、従来炉の場合と異なり、宇宙用原子炉という新しい概念に対して十分にメンタルモデルができあがっていないことに起因すると考えられる。そのため、概念設計モデルの理解には、その構造や機能を系統立てて階層的に表現し、人間の理解の過程を示す納得世界の構造を応用して、効率的なメンタルモデルの形成を支援する。また、その際の操作についても実行の淵と評価の淵の概念に従って操作性を重視したインタフェースを構築する。このような環境を実現するためには、主に AI 技術と VR 技術を用いる。宇宙用原子炉の構造や機能については、AI 技術の知識表現を用いて階層的に表現する。これによって、全体の設計機能は部

分的な機能へと分割・整理され、構造や機能構成の理解が促進される。また、部品構成や形状については、VR 技術のもつ“Reality”を生かして実際に宇宙用原子炉が目前にあるような提示方法を実現し、直観的理解を促進する。その際の操作についても、VR 技術の特徴を生かして直接操作を実現する。

一方、計算機シミュレーション実行段階では、各種パラメータの設定・シミュレーションプログラムの実行・結果の評価などの煩雑な作業が必要となる。そこで、このような煩雑な作業を円滑に行えるように前述の VR 技術、および AI 技術を用いる。特にパラメータ設定では、解析者が意図するものを数値化して設定したり、逆に数値からその程度を認識する必要がある。このパラメータ設定においては、VR 技術を用いて解析者に仮想的なモデル上で直接操作できるような環境を実現する。同様に、シミュレーション実行についても操作性を重視する。また、シミュレーション結果の評価では、AI 技術により設計条件違反の検出や過去の解析事例との比較などを行えるようにするとともに、解釈しやすい形で計算結果を提示する。

4.1.5.2 WWW を応用した非同期分散型協同設計支援環境 WINDS 構築のアプローチ

前述のように大規模工学システムの設計段階では、各種の専門的知識が必要なため、異なった分野の設計専門家が協同で設計作業を進めることも多い。また、現実的には複数の設計者が一堂に会して設計作業を進めていくとは限らない。そこで、WINDS では、VINDS で実現する機能をさらに発展させ、遠隔地に点在する複数の専門家が協同で設計を行う際の支援環境の構築を目指す。

ここでは、分散環境にいる複数の設計者が協同で概念設計を行う際の作業について、表 4-8 に示すように、その作業における問題点を抽出し、その問題点に対して認知工学の概念を用いて分析・解決方法を検討し、これを実現するためのコンピュータ技術について検討する。

表 4-8 WWW を応用した非同期分散型協同設計支援環境 WINDS 構築のアプローチ

作 業	問題点	認知工学の概念	コンピュータ技術
・ VINDS で支援する作業 ・ 複数人による協同作業	・ VINDS で挙げた問題点 ・ 協同作業としての問題点 ・ 複数の設計者が分散している可能性	・ VINDS で挙げた概念 ・ メンタルモデル	ネットワーク技術 (特に WWW 技術)

まず、VINDS で挙げた問題点については、ハイパーテキスト・画像・3次元モデルなどのマルチメディア機能が充実している WWW 技術を用いることによりほとんどが解決できると考えられる。ただし、VINDS のように直接操作による直観的な操作性の部分は実現できない。また、協同作業という観点から考えると、メンバー間で意思の疎通を欠いたり、連絡の齟齬で意図が誤って伝えられたり、誤解が基で誤った情報に基づいて作業が進められるなどの問題点がでてくる。これらは、情報共有・意見交換の不足によるものであり、設計対象物に対してメンバー間で異なったメンタルモデルが形成され、その結果、誤認識や誤解が生じると考えられる。この問題は、WWW サーバが設計情報を一括管理し、さらに連絡・意見交換・議論の場を設けることによって解決する。もちろん、WWW 技術を用いることによって分散している複数の設計者に対してもインターネットに接続されたコンピュータと WWW ブラウザさえあれば協同設計支援環境を提供できる。

本研究では、以上に述べてきたような着眼点から、仮想現実感を応用した概念設計支援環境 VINDS と WWW を応用した非同期分散型設計支援環境 WINDS を構築した。次節からは、この両者の詳細に

について説明する。

4.2 仮想現実感を応用した概念設計支援環境 VINDS

本節では、VINDS の基礎となる仮想現実感環境構築のためのシステム構成について説明し、ついで仮想現実感による統合的設計支援環境の基本的な方法とその構成、さらに実現した機能について述べる。

4.2.1 仮想現実感環境構築のための技術

VINDS で用いた仮想現実感環境は、基本的に 2.3.2 項で述べたように、

- 表示サブシステム
- 計測サブシステム
- シミュレーションサブシステム

の3つのサブシステムからなる構成方法を踏襲している。

以下、本項では、各サブシステムに対して VINDS が用いている方法について説明する。

4.2.1.1 表示サブシステム

表示サブシステムに関しては、人間の有する全ての感覚にわたって提示することが理想ではあるが、本研究では人間の感覚の中で大きな位置を占める視覚についてのみ行うこととした。本研究で考えた表示サブシステムは、大型ディスプレイと液晶シャッターを取りつけたメガネ(CrystalEyes^[4])とで構成される。このシステムを用いることにより大型ディスプレイに立体映像を表示することができる。

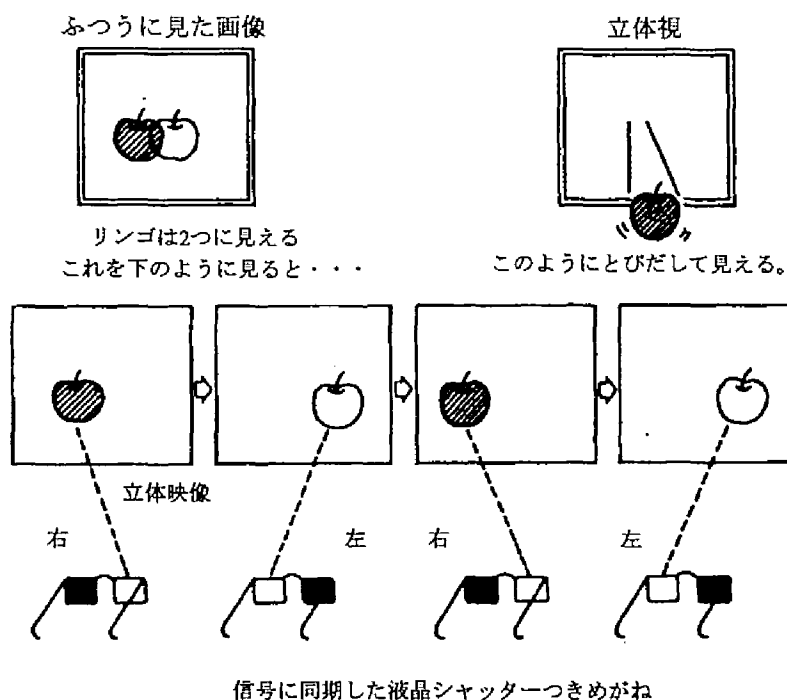


図 4-12 立体視の仕組み

図 4-12 に立体視の原理を示す。CrystalEyes のレンズの部分は液晶シャッターになっていて、120 Hz の速さで液晶シャッターが開閉している。もちろんこの速度では、人間の目には目の前が真っ暗になるという感じはない。この液晶シャッターを左右の眼で交互に開閉させ、これに同期して、左眼右眼用映像を切替えながら映す。この時人間は左右同時に、左眼右眼用それぞれの映像を見ているものと感じ、それらを脳で合成して立体的に感じ取ることができる。

4.2.1.2 計測サブシステム

計測サブシステムとしてはデータグローブの一種であるスーパードグローブとポヒマスセンサを用いている。スーパードグローブは、指の関節の屈曲角を計測することができる。これはスーパードグローブに備え付けられているベンドセンサによって計測される。

一方、ポヒマスセンサは、3次元空間内の位置と方向のベクトル情報(6次元情報)を磁界によって測定することのできるセンサである。

4.2.1.3 シミュレーションサブシステム

シミュレーションサブシステムは、この仮想現実感環境の中心的役割を果たす部分である。前述の2つのサブシステム、すなわち表示サブシステムと計測サブシステムは仮想現実感環境における入出力部分であったが、シミュレーションサブシステムは仮想空間と実空間とを対応付ける計算を行う部分である。

このサブシステムは WorldToolKit(WTK)^{[5][6]}というソフトウェアを骨組みとして構成されている。WTK は仮想現実感環境を構築するためのツールであり、その内容は、200 種類以上の C 言語のライブラリで構成されている。これらのライブラリにより仮想世界を構築し取り扱うのに必要な基本的な操作(簡単な 3D モデルの作成プログラムとのインタラクションなど)のすべてを行うことができる。また、WTK はマウス、3次元位置センサである FASTRAK(ポヒマスセンサ)、立体視を可能にする CrystalEyes をサポートしている。このような 3次元入力装置や立体視装置を接続すれば、より高品位の仮想現実感環境を実現することができる。以上のように WTK の機能を利用することによって、短時間で仮想現実感環境を構築することが可能である。

しかし、この WTK だけの機能では単純図形(球、円錐、円筒など)しか作成できない。そこで、複雑な 3次元モデルは、WTK で取り扱うことができる DXF 形式をサポートしている AutoCAD^[7]というソフトウェアにより作成することにした。AutoCAD は計算機を用いてさまざまな図形を作成する汎用図形作成用ソフトウェアであり、従来の CAD ツールに比べて 3次元物体の作成能力に優れている。そのため、本研究の対象である宇宙用原子炉のような複雑な 3次元構造物を正確に作成することができる。

4.2.2 VINDS の基本的方法とその構成

VINDS では、これまで述べてきたように VR 技術を応用して設計支援環境を実現することを目指している。設計支援の主題としては大きく次の 3つに分けられる。

第 1 に、仮想現実感環境内での対象の表現である。宇宙用原子炉を例として研究を進めているが、ここでは対象の構造物としての表現と機能の表現を仮想現実感の利点を最大限に生かして実現することが課題である。

第 2 に、対象の計算機上への知識表現に関する研究である。知的な設計支援を実現するためには、対

象に関する知識を計算機上に系統的に表現する必要がある。更にこの知識表現を、仮想空間内での表現と有機的に結合させなくてはならない。

第3に、設計過程における数値計算の効率化の問題である。工学的な構造物の設計においては、設計の妥当性の評価を行うために、複雑な数値計算を繰り返す行わなければならない場合が多い。そこで、本研究では仮想現実感環境内から設計内容の変更を反映させた数値解析がリモート計算機で実行できるような環境の実現を目指している。なぜなら、この計算実行過程のみが仮想空間から独立しては、仮想現実感環境内ですべてを行うという目的からはずれてしまう上、仮想現実感環境内で作業するのと、従来の現実空間でキーボードから入力するといった動作が混ざり合うようになり、その環境は効率的な環境とは言えなくなるからである。また、このような数値計算は多くの場合大きな計算負荷を要求されるので、利用可能なリモートの計算機に負荷の分散を考えなければならないからである。

4.2.2.1 構造物の表現

本システムの中心となる機能は、実体構造の3次元表現とそれに基づく支援機能である。本システムで対象にしている宇宙用原子炉は設計の段階であり、実物は存在しない。従って、設計支援においてはその実体構造を“Reality”を持って表現できることが非常に重要である。更に、その表現はただ眺めるだけの静的なものではなくて、その実体構造の表現上で直接操作の利点を積極的に用いて様々な操作を可能とする必要がある。

実体構造の操作

実体構造の表現については、次のような操作を実現することを目指す。構造物の内容の詳細な理解を支援するために、設計者は仮想現実感環境内で構造物を様々な階層で捉えることができるようにする。つまり、全体像から部品レベルまでの詳細度の階層を自由に移動できる環境を構築する。また内部の構造を理解するために、外部の構造物をはぎ取っていくような操作も実現する。これにより、設計者はイメージの中でしか存在しない設計物を実際に存在するかのように見ることができ、対象物体を理解するためのメンタルモデル形成を促進させることができる。

また、設計段階においては様々な角度から様々な大きさで設計対象を見る必要が生じる。よって、設計者の視点が任意の角度と場所に移動できるようにする必要がある。

設計パラメータの変更

設計過程では、複数の設計パラメータの制約範囲内での総合的な最適化が重要な問題となる。ここでは、主要な設計値の変更を仮想現実感の持つ直観的理解と直接操作の特徴を利用して実現することを目指す。例えば、TFEセル内のエミッタの幅などの幾何形状を変化させ、その変化によって原子炉の発電効率がどのように変化するかを調べようとするとき、エミッタ幅の変更を直接操作により直観的に行えるようにする。

この設計値の変更の影響は数値解析により評価されるわけであるが、どの数値計算も仮想現実感環境内から操作され、更に影響の評価結果は仮想現実感環境内に表示され、仮想現実感環境から抜けることなく変更の影響を検討することができるようにする。

4.2.2.2 計算機上への知識表現

ここでは、計算機上での知識表現について述べる。概念設計のような知的集約型の作業の支援を実現するためには、対象に関する知識を計算機上に系統的に表現する必要がある。更に、この知識表現を仮想空間内での表現と有機的に結び付ける必要がある。そこで、どのような情報や機能が必要か、どのような構造が適切か、また実際にどのような方法で表現するのが適切であるかを検討した。

VINDS においては、原子炉構造の表現方法として原子炉を構成する部品の情報に注目し、部品をデータの単位とすることにした。その理由は以下に示す通りである。

1. 構成部品の情報があれば、それらの組立情報を記述するだけで原子炉の構造が表現できる。
2. 構成部品の情報とそれらの組立情報があれば、核設計や熱設計などにおける各種工学解析が可能となる。
3. 部品を単位とすることで、設計が進んだ際の部品の追加や削除が容易になり、また形状の変更などが部品ごとに行えるようになるなど、実際の組立作業で行うことに近い取り扱いが可能になる。

部品をデータの単位とした場合には、上にも述べたようにその組立情報は必要不可欠である。このように、部品を単位とした場合、組立の情報をどのように表現するかが問題となる。原子炉を数々の部品の組合せとして捉えた場合、その組立情報は部品の階層構造として表現されると考えられる。しかしながら、このように原子炉の階層構造を部品の階層構造表現によって表すだけでは設計を進めていく上では情報として不十分である。更に、各部品の形態情報や材料の種類や材料の物性値などの具体的な情報もつけ加えなければならない。

設計の過程では、これらの機能と実体との関連性を考えることが重要であることは言うまでもない。Sue は設計の第一公理として「独立公理」(必要機能の独立公理を保て)を提唱している^[8]。この独立公理のいわんとするところは『人工物の実体の理想的な部品構成は個々の部品の機能を独立化させることにより達成される』というものである。そしてこの独立公理の具体的な適用法として、実体構造と機能の双方の階層性に一对一の対応を図るように実体構造の階層的設計を行うべきものとしている。

そこで、本研究ではこの独立公理に従って設計対象が設計されるとして、実体構造と機能の一对一対応の機能の階層構造を考えた。このことは、部品をただ組み合わせただけでは原子炉としての機能が達成されているかどうか分からないが、階層構造になっている部品の機能がそれぞれ達成できれば、その組み合わせである原子炉の機能も達成されると考えられるということを示している。その階層構造を図 4-13 に示す。

VINDS では、このような機能の階層的な構造を仮想空間内で表現し、その関連性の理解を支援する。また、設計パラメータの変更により最終目標の達成が阻害されるような場合が考えられるが、その場合はこの機能の階層構造の表現の中でその影響を検討することができる。

以上、実体構造と機能の関連性の理解は設計の過程において最も重要なものの一つである。機能を実現するものとして実体があり、実体によって機能は実現される。VINDS では、どの実体がどの機能を実現しているのか、また、どの機能がどの実体により実現されているのかという双方向の関連を系統的に提供できる環境を構築する。

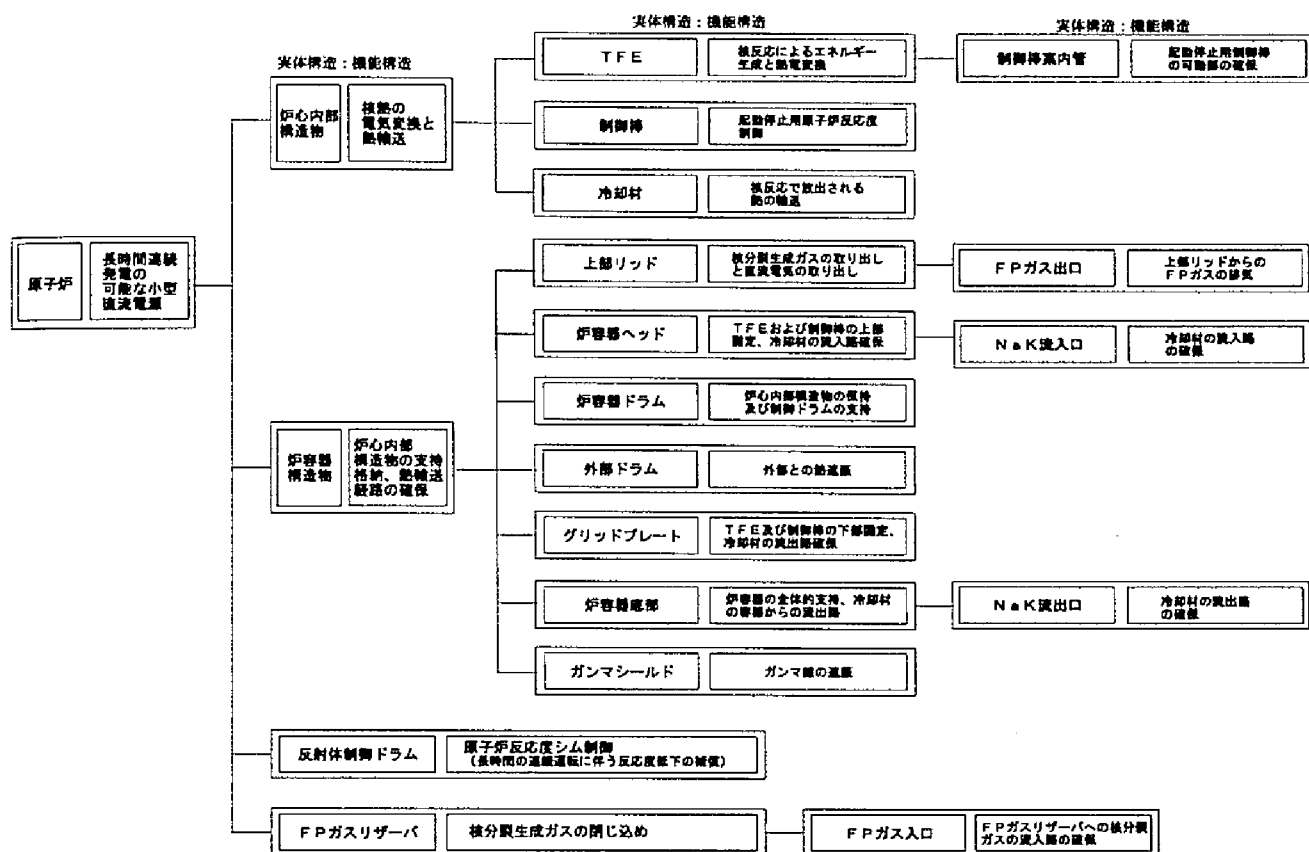


図 4-13 実体構造－機能一対一対応の知識の階層構造

4.2.2.3 数値計算支援

設計パラメータの変更 → 数値計算 → 影響の評価という一連の過程は一度で終了するわけではなく、通常は繰り返し実行される。数値計算自体は、元来、仮想現実感技術の操作性を有効に利用できるものとは考えられないが、この過程だけが仮想現実感環境から独立しては、解析全体が非効率的になってしまう。従って、設計過程における繰り返しの数値計算過程を既存の仮想現実感技術でできるだけ自然に実現できる環境を構築することは、全体的な効率を考える上で重要である。そのため、VINDSでは、設計パラメータの変更、それに伴う解析入力ファイルの作成、解析の実行という一連の過程を仮想現実感環境内から実行できる環境を構築する。また、数値計算に関しては、もう一つ重要な研究課題を設定している。それはネットワーク環境を積極的に利用した分散型計算の実現である。計算機のハードウェア環境は急速に進歩しているが、現状では仮想現実感用のグラフィックスワークステーションで計算負荷の高い設計のための数値計算を行うことは、計算・描画能力を考えると適切ではない。そこで、VINDSでは、数値計算をネットワークで接続された別の数値計算に適した計算機で実行することとし、負荷の分散をはかる。更に、その計算機を一つに限定せず複数の計算機で計算が実行できるようにする。

設計のための数値計算の結果は、ネットワーク上の計算機から数値データとして返送されてくるが、この結果をできるだけ解釈しやすい形で設計者に提供することを目指し、仮想現実感環境内での計算結果の可視化についても検討を行う。このような工学的な数値計算結果の可視化という研究は流体などの分野を中心に行われている。宇宙用原子炉の概念設計では、材料温度や実効増倍率だけでなく、仮想現実感環境の利点を生かし、冷却材の流れや温度分布などの計算結果を3次元で表示できるようにする。

4.2.2.4 システムの全体構成

図 4-14に VINDS の全体構成を示す。

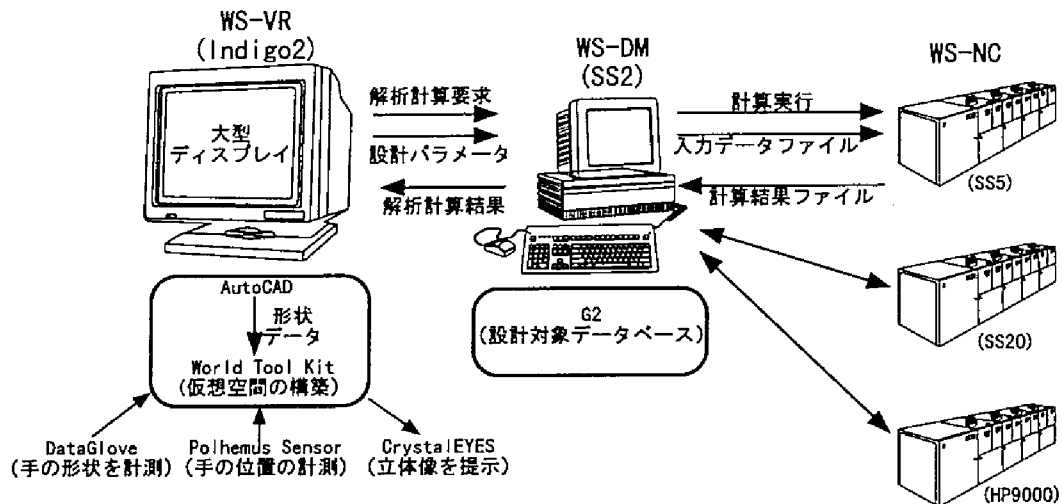


図 4-14 VINDS システムの全体構成

システムは 3 種類のワークステーションから成り立っている。すなわち、仮想現実感環境のためのグラフィックスを生成するワークステーション、設計知識を管理のためのワークステーション、および数値計算用のワークステーションである。これらの 3 種類のワークステーションは、ネットワークでつながれた分散環境で動作するものであるが、設計者はこのシステムとは仮想現実感用ワークステーションを通してのみ操作するだけで良い。

これらのワークステーション間のデータの受け渡しは、NFS(Network File System)により共有されているファイルを用いて行った。その理由は、設計知識データベース管理用ワークステーション上で動いている、後に述べる G2 というソフトウェア内で管理されているデータとアクセスする場合、ファイルを介して行うのが最良と判断したからである。

まずはじめに、このシステムの中心的役割を果たす設計知識データベース管理用ワークステーション上で動かす G2 というソフトウェアについて説明する。その後、G2 との関連も交えながら個々のワークステーションについて述べる。

リアルタイムエキスパートシステム構築ツール G2

本設計支援システムでは、データの管理や数値計算の実行依頼といったシステムの中心部分をこの G2 による管理ソフトウェアが行っている。WTK を用いた仮想環境提示部分は、ただ単に設計者からの入力と 3 次元表現による出力を行うだけなので、本質的にはこの G2 による管理ソフトウェアが本設計支援システムの中心部分であるといえる。

G2 は、連続的で知的な監視(モニター)診断制御が必要な複雑なアプリケーションに対するリアルタイム・エキスパートシステムの開発、実行のためのツールである[9]。例えば、プロセス制御、航空、資金運用のような多様な分野の広範なリアルタイムアプリケーションを構築できる。VINDS では、G2 の機能の中で、ルールベース推論(推論エンジン)、ネットワーク接続、オブジェクト指向によるモデル化などに着目して、設計知識データベース作成のツールとして G2 を選定した。

G2 により構築した管理ソフトウェアは、設計知識データベースの管理や各計算機への計算実行の依

制約違反かどうかの判断を行っている。他の計算機とのデータの受け渡しは、前述したように NFS による共有ファイルを用いている。この時、共有されたファイルは、大きく分けて、計算の制御を行う制御ファイル、設計パラメータの入出力を格納するパラメータファイル、そして設計制約違反ファイルがある。G2 は 1 秒ごとにファイルの内容を監視して、その内容が変化したときにアクションを起こすという“イベント駆動型制御”を採用しており、制御ファイルはその監視制御に用いられる。具体的には、計算の実行を開始するファイル、計算中かどうかを示すファイル、計算データの保存を行うファイルがある。パラメータファイルは、変化させたパラメータとその計算結果から出てくる発電効率等の値を保持するファイルである。制約違反ファイルは、冷却材の温度燃料の温度等の制約違反に関する情報を告知するファイルである。

次に、エキスパートシステムの利点を生かしたルールベース推論について説明する。ここでは冷却材の温度、燃料の沸点、原子炉実効増倍率 $k_{effective}$ の値により、その設計事例が制約条件を満たしているかどうかを判断する。その結果は制約違反ファイルに書き込まれる。以下、図 4-15 から図 4-18 に G2 のオブジェクトを示す。

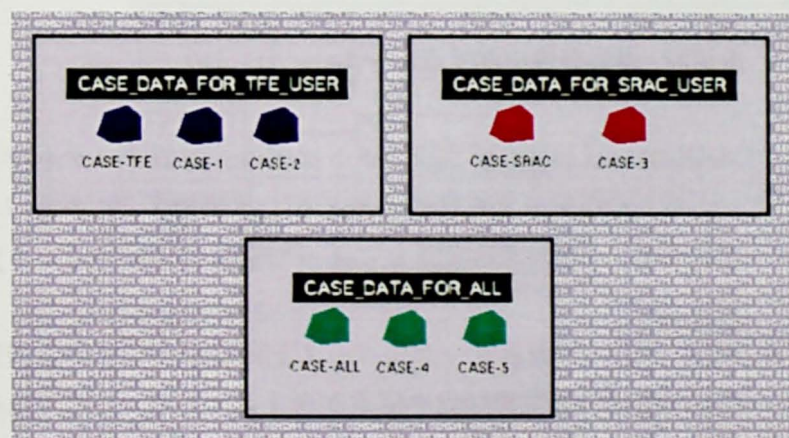


図 4-16 G2 における入出力データを持ったオブジェクト

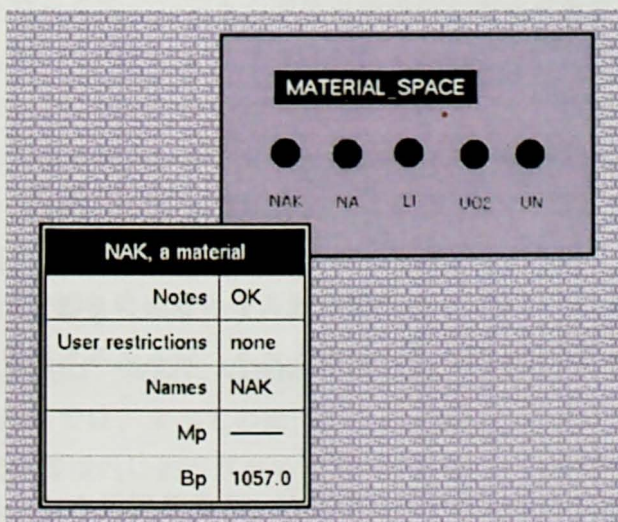


図 4-17 物質の融点、沸点を含んだオブジェクト

CASE-ALL a case dthor	
Notes	OK
User restrictions	none
Names	CASE-ALL
Coolant	1.0
Flc	4.05
Fl1	4.05
Fl2	4.05
Fl3	4.05
Fl4	4.05
Fl5	1.15
Fl6	1.2
V	1.5
Ten	1000.0
Tout 1	1506.486
Tout 2	1514.501
Tout 3	1521.411
Tout 4	1532.132
Tout 5	1540.181
Tout 6	1546.915
Tin 1	2281.886
Tin 2	2406.377
Tin 3	2471.979
Tin 4	2476.376
Tin 5	2414.144
Tin 6	2298.522
P aH	0.007
P1	0.009
P2	0.009
P3	0.009
Fuel	1.0
Hole	1.0
Core size 12	2.0
Ref d	0.0
Core size 21	18.0
Core size 22	4.0
Core size 23	2.0
N	7.0
Keff old out	1.184
Keff old in	0.962
Keff fresh out	1.218
Keff fresh in	0.99
P31	0.009
P32	0.009
P33	0.009

図 4-15 入出力データを持ったオブジェクトの中身

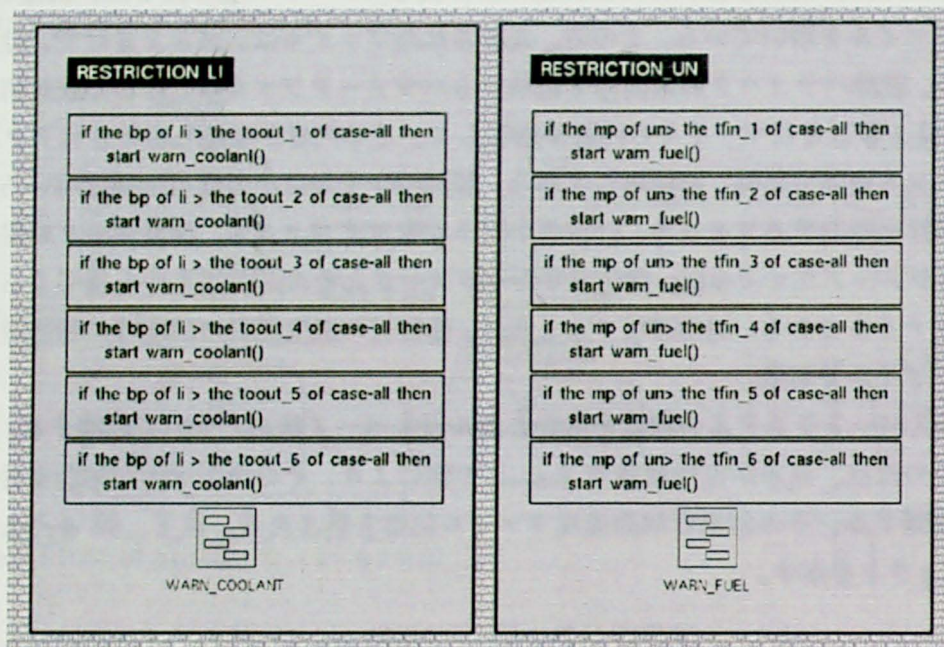


図 4-18 冷却材、燃料温度に関するルール

図 4-16で“CASE-1”、“CASE-2”、“CASE-3”・・・とあるオブジェクトは属性に計算データを持ち、その内容は図 4-15のようになっている。このようなデータを幾つも蓄えることができ、エキスパートシステムの中に蓄えられたデータの利点を生かし、ルールを書くことによって簡単に参照することができる。

また、図 4-17中の“MATERIAL_SPACE”と書いてあるワークスペース上に表示されている円形のオブジェクトは物質を表しており、その属性にはその物質の融点や沸点が含まれている。ここでは冷却材を示している。

図 4-18の“RESTRICTION_LI”、“RESTRICTION_UN”と書いてあるワークスペースには、冷却材の制約違反に関するルール、燃料の制約違反に関するルールがそれぞれ記述されている。

次に、VINDS を構成するそれぞれのワークステーションの役割を説明する。

仮想現実感用ワークステーション

図 4-19に仮想現実感用ワークステーションのハードウェア構成を示す。このワークステーションは仮想現実感環境の中核をなす部分で、前述のように WTK を用いて仮想現実感環境を構成している。設計者は、このワークステーションのみを介して他のワークステーションにアクセスするようにしているために、他の 2 つの計算機が存在を意識することはない。他のワークステーションとは NFS を用いてファイルを介してデータの授受を行うので、その際のファイルの書き込み、読み込みも行う。

設計知識データベース管理用ワークステーション

設計に関する情報の管理は、動的かつ柔軟に行わなければならないが、画像処理用のワークステーションにおいて全ての処理を実行することは計算速度や描画速度が下がるという点から不適切であると判断した。特に、仮想現実感においては人間に不自然感を与えない程度の速度は必須である。そこで、データの管理は別のワークステーションにおいて行うことにした。VINDS ではネットワークにより接

続された別のワークステーション上で設計関連のデータベース管理を行うこととし、そこでのデータ管理環境構築には、前述のようにリアルタイムエキスパートシステム構築ツール G2 を採用した。G2 は NFS により双方のワークステーションに共有されている制御ファイルを常に監視していて、その値が仮想空間からの入力により変化したとき数値計算用ワークステーションに計算実行の命令を出すなどの役割を果たす。

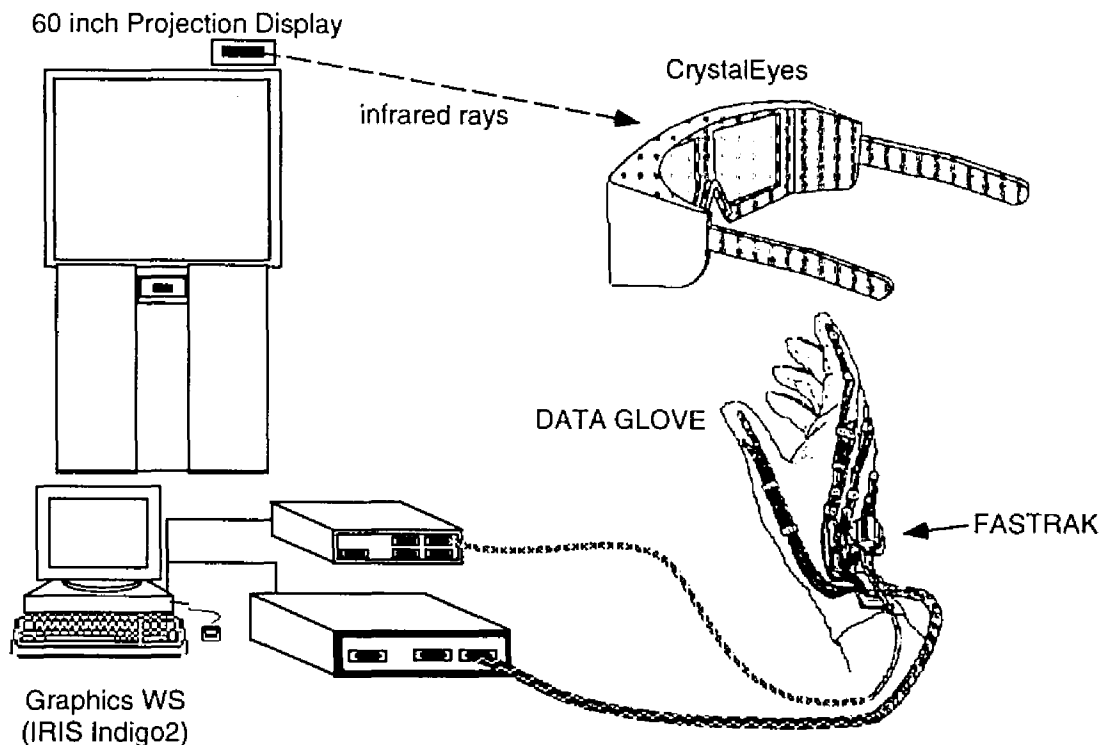


図 4-19 仮想現実感環境のハードウェア構成

数値計算用ワークステーション

データベース管理と同様に、数値計算も仮想現実感用のワークステーションに負荷をかけないようにネットワークでつながれた数値計算専用のワークステーションで行う。この計算は、仮想現実感環境を監視している G2 によりリモートシェルを用いて実行される。更に、数値計算用ワークステーションは、そのワークステーションが現在使用中かといった状況で計算スピードが変化するので、複数の計算機を用意してその時々状況に応じて適切な計算機を選択できるようにする。

4.2.3 VINDS の機能とその動作検証

図 4-20 は、実際に VINDS で概念設計作業をしている様子である。

VINDS では、すべての操作がデータグローブをはめた手によって行うことができる。図 4-21 は仮想現実感環境内に表示される“手”である。この仮想の手は仮想現実感環境内で実空間内の手と同じように振る舞うことができる。また、設計者が装着している立体視メガネ CrystalEyes により、大型ディスプレイに映された画面を立体的に見ることができる。



図 4-20 VINDS による概念設計作業風景



図 4-21 仮想空間内に表示される”手”

以下では、VINDS の具体的な機能を説明し、その動作を検証するために、実際に概念設計を行っている時の提示画面を順に示す。

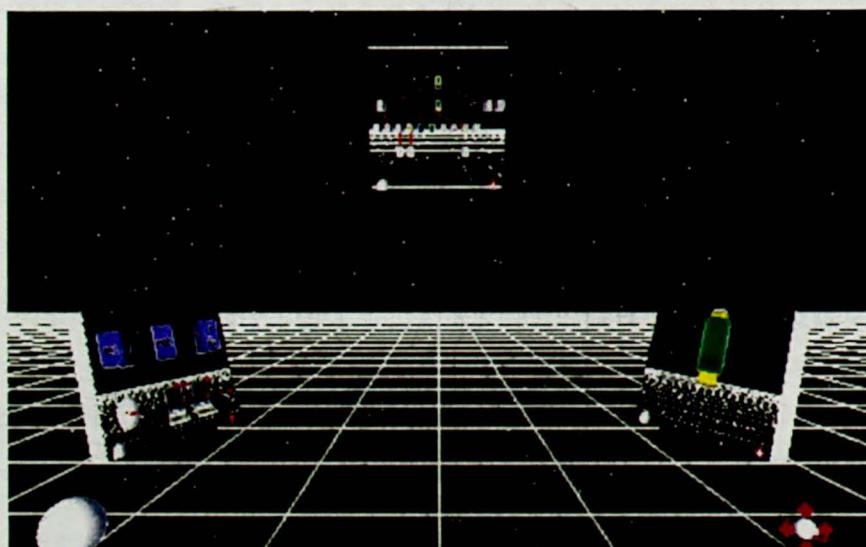


図 4-22 VINDS システムのメニュー画面

実際にシステムを使って最初に目にするのは、図 4-22 のメニュー画面である。

ここでは、Structural World、Functional World、Analysis World の 3 つの World を設定している。メニュー画面に表示されている 3 つの板にテクスチャとしてそれぞれの World の画面が提示されている。Structural World では、宇宙用原子炉の実体構造を提示する。Functional World では、階層的な機能構成を提示する。また、Analysis World では、解析計算支援を行う。これらの World のテクスチャが貼ってある板を前述の仮想の手を使って手前にもってこることによって、設計者はこれらの World に入ることができる。これらの World は、それぞれこのメニュー画面を頂点とした階層構造になっており、World の中は更に幾つかに分れている。そして、左下のボールを掴むことによって上の階層に上がることができる。また、この支援環境では、どの階層においても視点が移動できるようにしている。これは、特に実体構造を見る Structural World で構造物をあらゆる視点から見るができるという点において効果がある。視点の移動には、右下の矢印が 6 方向についているボールを用いる。このボールをつかんで仮想の手を動かすと視点を移動させることができる。具体的には、視点が手と同じ方向に動き、手を上に持っていくと視点が上に、手を右に持っていくと視点が右に、手を前に持っていくと視点が前に移動する。

以下では、それぞれの World について詳しく説明する。

Structural World

Structural World は構造物の表現を行う World で、仮想現実感による“Reality”の特徴を最も良く生かしている World である。図 4-23 に Structural World の提示画面を示す。

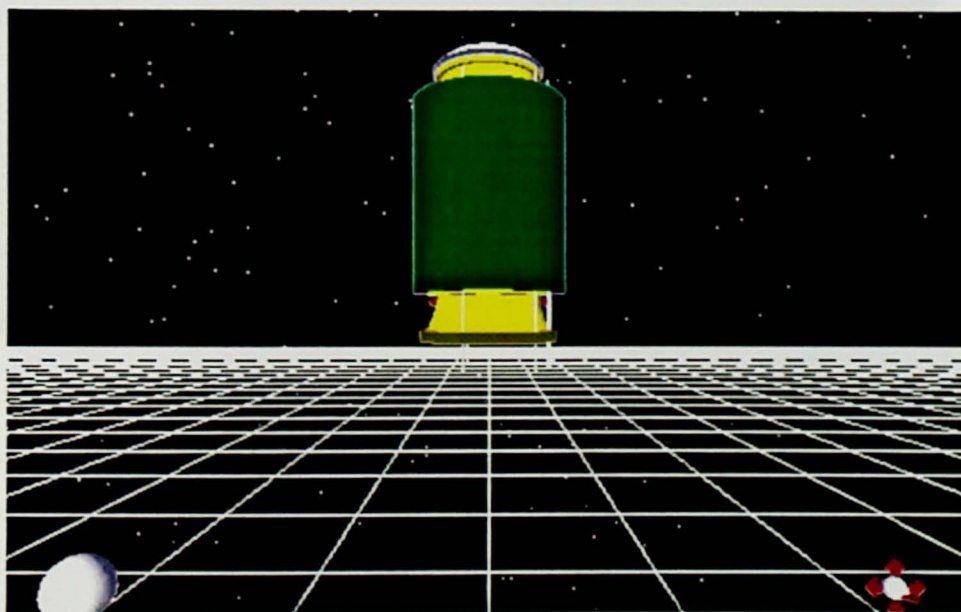


図 4-23 Structural World の画面

この Structural World では、実際には存在しない宇宙用原子炉の構造を立体的に見てその構造を把握することができる。また、仮想現実感の特徴を生かし、図 4-24 のように宇宙用原子炉の部品を手で持って移動し、部品の取り外しを行うことができる。このように、外側の部品を取り外すことによって原子炉内部まで構造を把握することができる(図 4-25)。



図 4-24 Structural World で部品を手を持っている画面

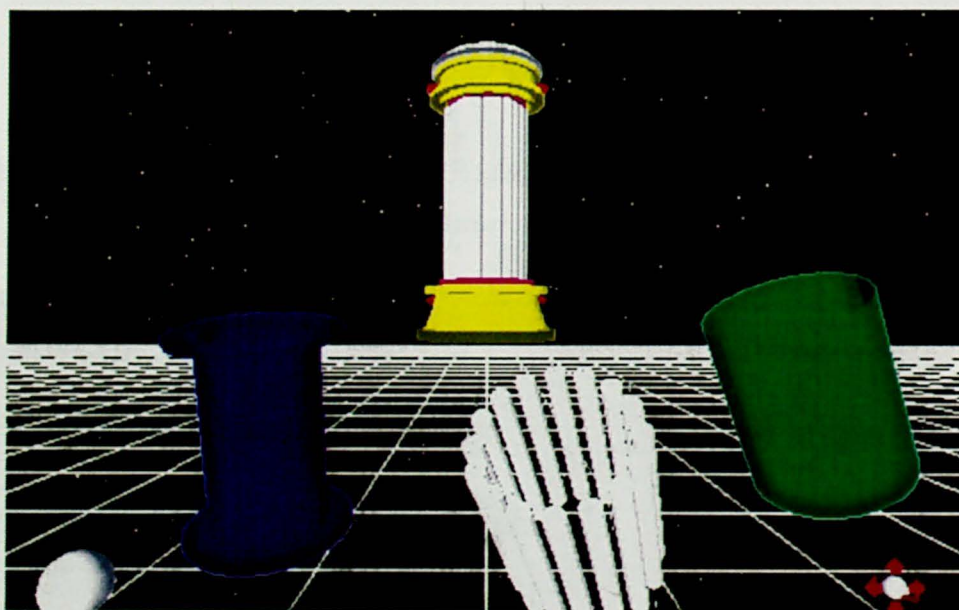


図 4-25 Structural World で部品の取り外しを行った画面

Functional World

図 4-26は、Functional World の画面を表している。

Functional World は、部品－機能の階層構造を表示する World である。この World では、機能と構造の一対一対応表現をどのように仮想現実感環境の中に表現するかが課題となる。実体構造は部品の形を見れば分かるが、機能はそれでは分からないので、まず実体構造を用いて階層構造を作り、その実体構造を手で掴むことにより機能を文字情報として引き出せるようにした。しかし、Structural World で用いた 3 次元モデルをそのまま実体構造の階層構造に利用すると 3 次元データ量が非常に多くなり、仮想環境の動作が遅くなってしまう。2.2.2.3 で述べた Card らのパフォーマンスモデルで考えると、仮想現実感環境での認知過程には次のような処理時間がかかる。

眼球運動 230ms → 知覚プロセッサ 100ms → 認知プロセッサ 70ms (計 400ms)

ただし、上記の処理時間は標準値である。設計者に不自然感を与えないようにするためには、仮想環境の提示サイクルは上記の合計時間である 400ms を大きく上回らないようにする必要がある。そこで、図 4-26 のように立方体に実体構造のテクスチャを貼り付けたアイコンにより階層構造を表現し、大量のデータによる描画速度の低下を防ぎ、自然な操作性を実現した。

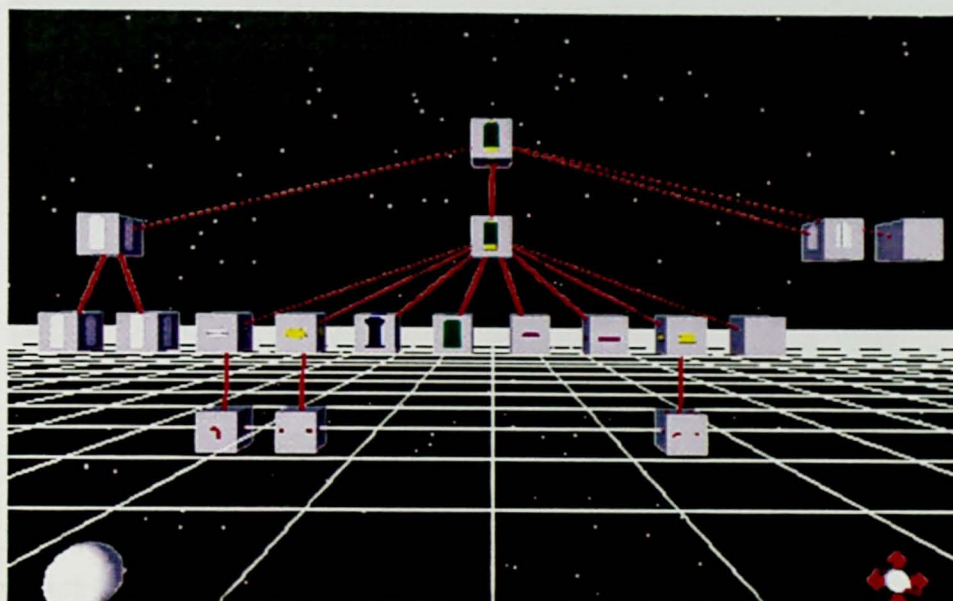


図 4-26 Functional World の画面

この図では図 4-13 に示した部品の階層構造が仮想空間内に再現されている。階層構造になっている部品のアイコンをつかむと、図 4-27 の画面が提示される。この画面では回転制御ドラムの部品の構造を 3 次元モデルで、その機能を文字で示している。この 3 次元モデルは、Structural World で使ったものと同じモデルで、同じように仮想の手を使って動かすことができる。

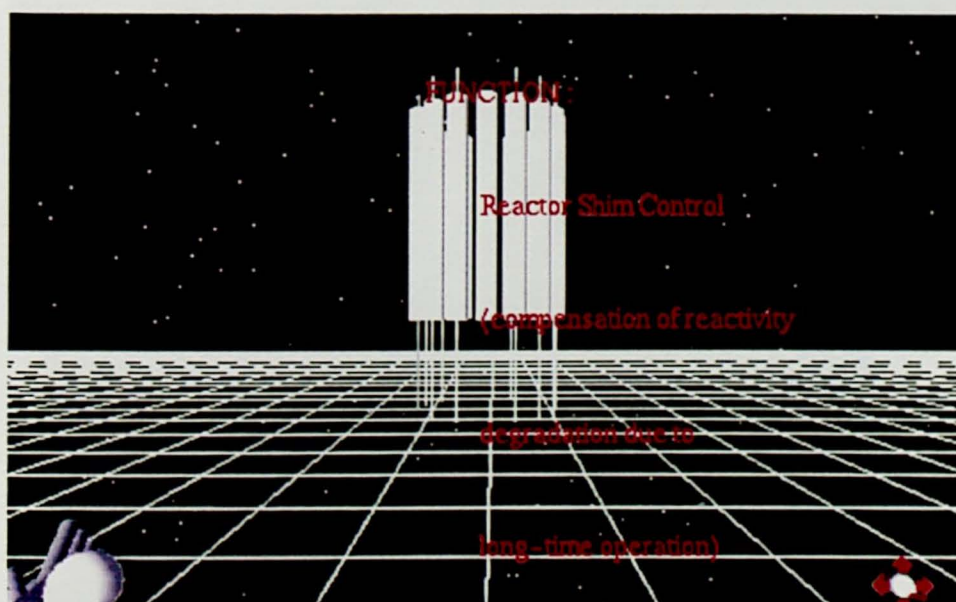


図 4-27 Functional World 内で部品の機能を表示する画面

Analysis World

Analysis World で行う操作は、入力パラメータの変更、数値計算の実行、および計算結果の表示である。図 4-28 に Analysis World の提示画面を示す。

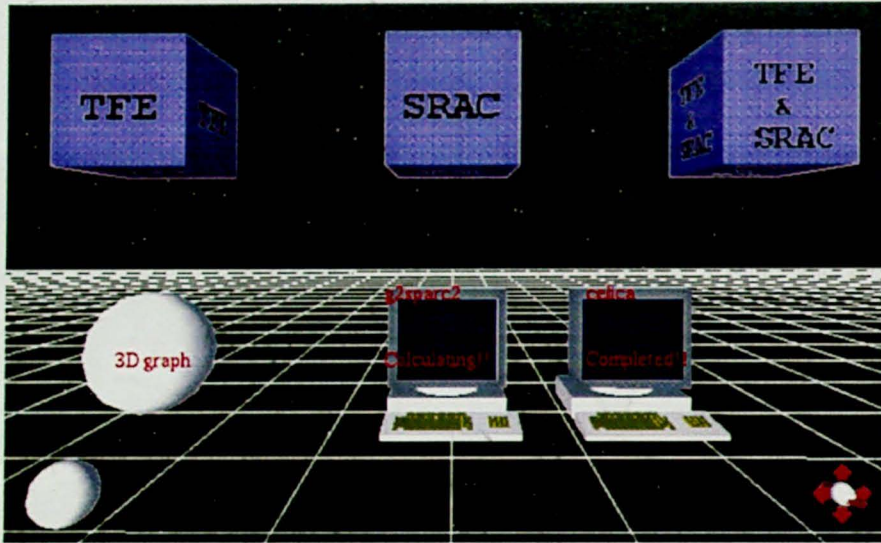


図 4-28 Analysis World の画面

Analysis World で支援する解析計算は、TFE 計算、SRAC、およびそれらの複合収束計算の 3 種類である。これらの計算の選択は、図上部の 3 つのアイコンによって行われる。これらのアイコンのうち、例えば、TFE-SRAC 複合収束計算を行うには右上のアイコンを掴めば良い。すると、図 4-29 のようなパラメータ名が描かれたアイコンが並んだ画面が提示される。ここには、変更できるパラメータが 8 種類並んでいる。左上から、冷却材の種類、燃料の種類、中心孔の有無、TFE ピンの列数、TFE セルの幾何形状、左下から、炉心の r-z 方向サイズ、冷却材の流速、冷却材入口温度である。パラメータを変更するには、それぞれのアイコンを仮想の手でつかむ。その後、そのパラメータに応じたパラメータ設定画面が現れる。

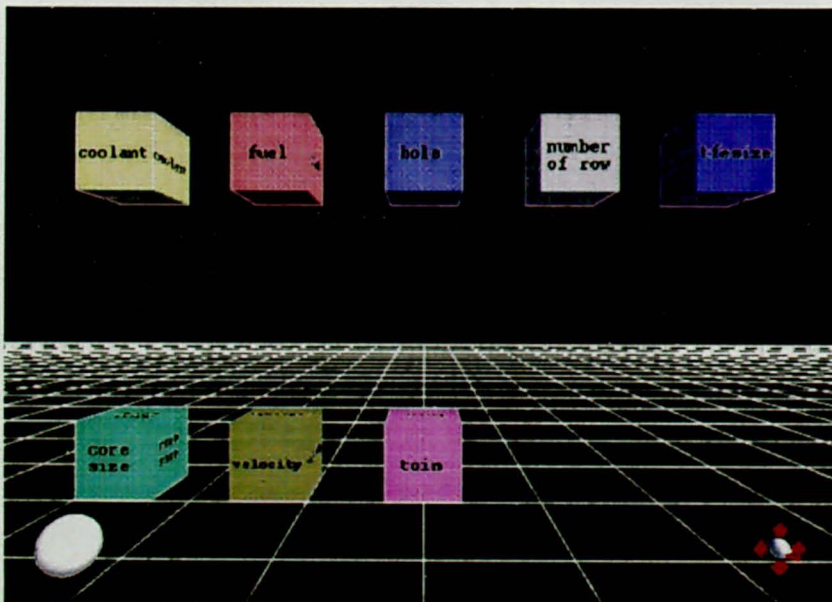


図 4-29 Analysis World 内で変更可能なパラメータを表示した画面

例えば、冷却材の種類を変更するには、右上の“coolant”と書いてあるアイコンを掴む。すると、図 4-30の画面が提示され、ここで冷却材の種類を選択できる。この図は、冷却材に Li を選んだところである。

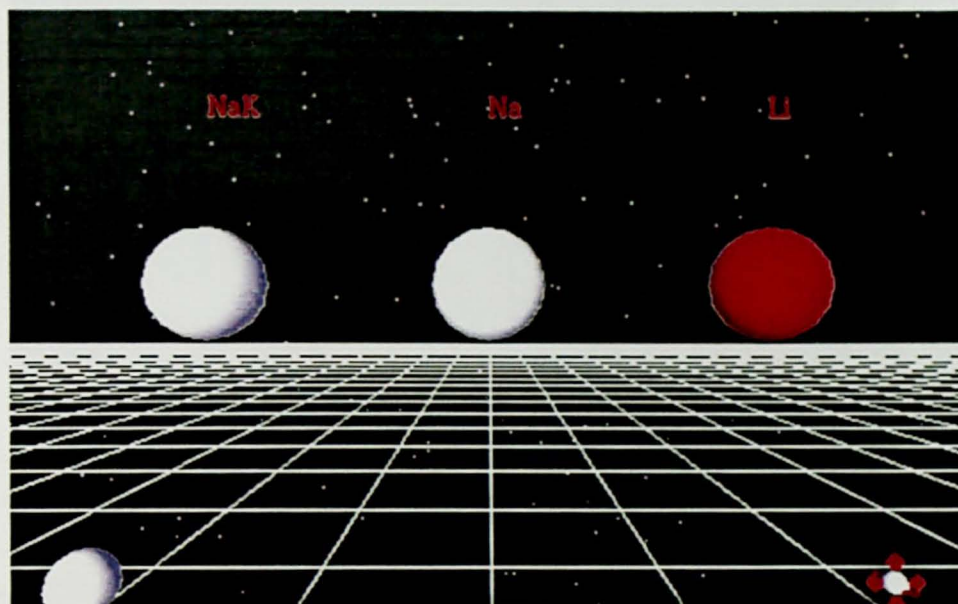


図 4-30 冷却材の種類を選択する画面

また、TFE セルの列数の選択画面は、冷却材の場合と同様、図 4-31のようになる。

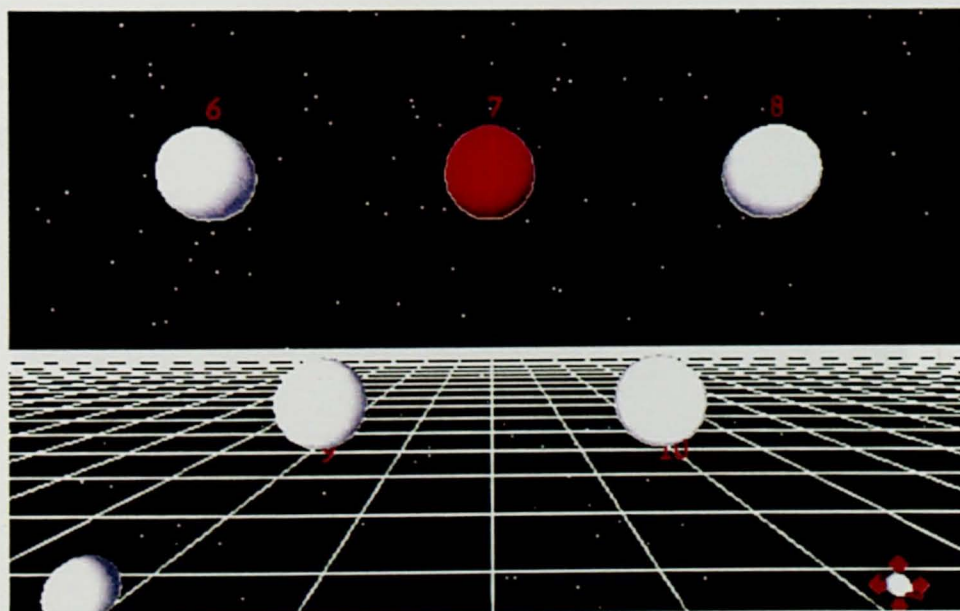


図 4-31 TFE ピンの列数を選択する画面

TFE セルの幾何形状の変更は、図 4-29 右上のアイコンをつかむと現れる図 4-32の画面で行う。

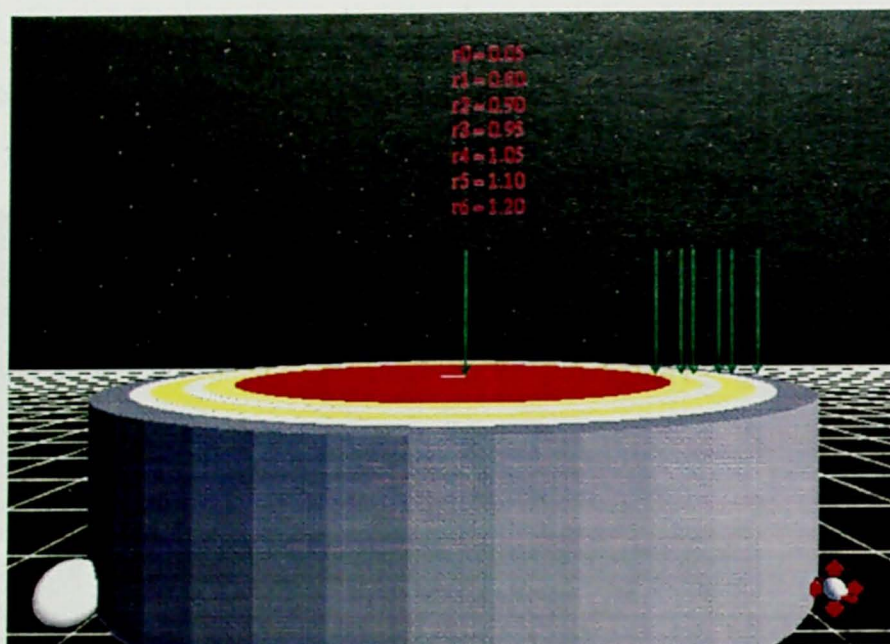


図 4-32 TFE セルの形状を変更する画面

この図は、TFE セルの全周を描いた模式図で、赤い部分は燃料部分、黄色い部分はエミッターコレクタ、白い部分はギャップ、一番外側の灰色の部分は冷却材を表している。ここでは、仮想現実感の特徴を生かし、TFE セルのサイズ変更を視覚的に確認しながら仮想の手で変更することができる。これらのサイズは、緑色の矢印を仮想の手で掴んで動かすことにより変更できる。そのサイズは画面上に数値としても表示している。

炉心の r - z 方向のサイズの変更は、図 4-33 の画面で行う。

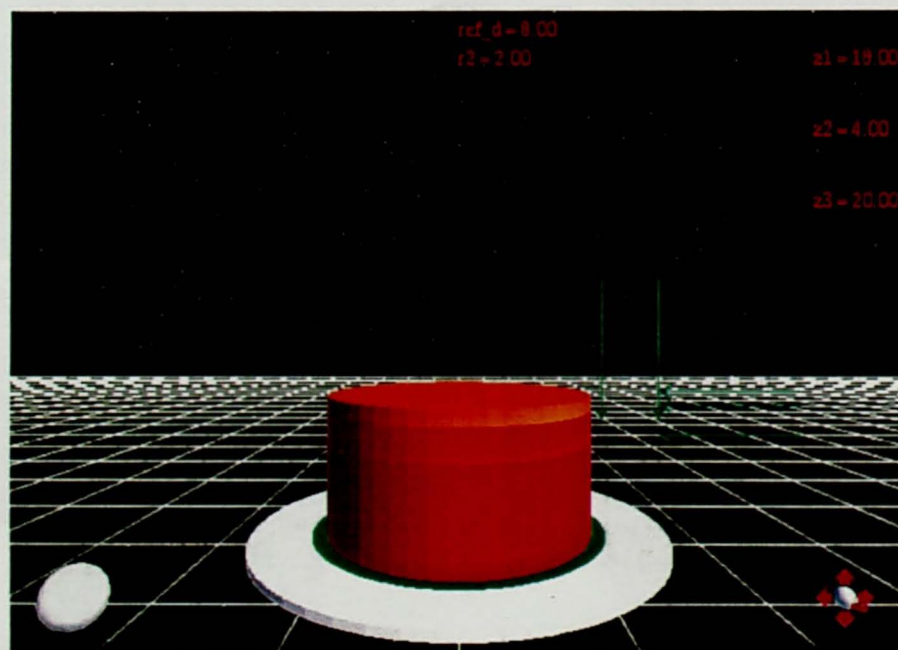


図 4-33 炉心 r - z 形状を変更する画面

この図は炉心の形状の上半分を描いた図で、内側から上に向かって z 方向に、赤い部分が TFE ピンが入っている部分、薄い赤の部分が反射体部分、オレンジ色の部分が吸収体を表している。また内側か

ら外側に向かって r 方向に、緑色の部分はベッセルドラムの厚さ、白い部分が回転制御ドラムの太さを表している。この値の変更も、緑色の矢印を掴んで動かすことにより達成できる。

冷却材の流速変更は、図 4-34 の画面で行う。この画面では、黄色いつまみを仮想の手で上下することにより連続的な値を持つパラメータを変更することができる。冷却材入口温度も同様の画面で変更することができる。

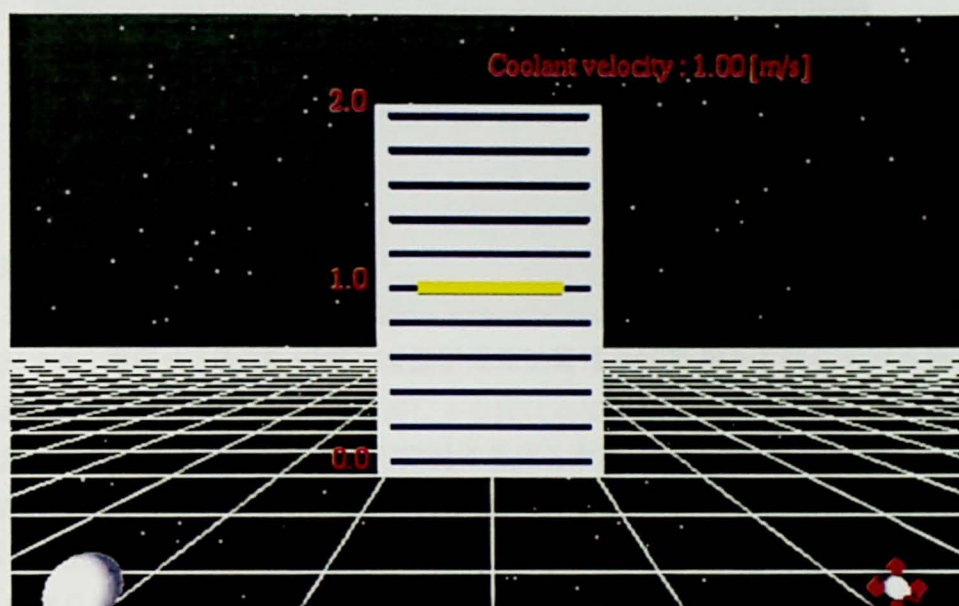


図 4-34 冷却材の流速を変更する画面

また、図 4-28 で TFE 計算、SRAC 計算の単独の計算を選んだときも同様な操作で入力パラメータが変更可能である。この場合は、設定するパラメータが SRAC-TFE 複合収束計算の場合とは若干異なり、TFE 計算の場合は図 4-35 となり変更可能なパラメータの種類は 9 つ、SRAC 計算の場合は図 4-36 となり変更可能なパラメータの種類は 6 つとなる。

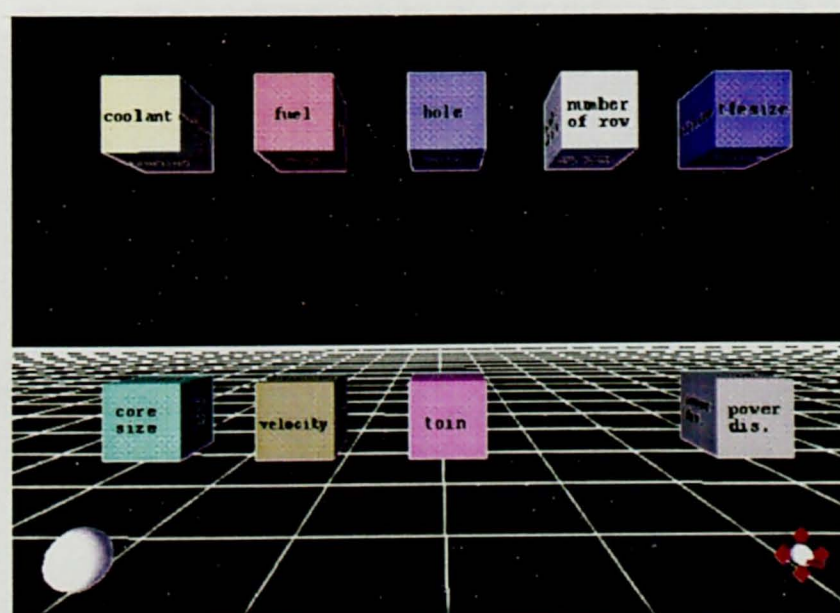


図 4-35 TFE 計算で変更可能なパラメータを示した画面

以上のように本節では、4.1節で述べた宇宙用原子炉の概念設計を対象として構築した仮想現実感を応用した概念設計支援システム VINDS について、仮想現実感構成のためのシステム構成、VINDS の基本的方法とその構成、および実現した機能と実際の例による検証について述べた。次節では、この VINDS の機能を発展させ、さらに協同作業を支援する WWW を応用した非同期分散型設計支援環境 WINDS の詳細について述べる。

4.3 WWW を応用した非同期分散型協同設計支援環境 WINDS

本節では、協同作業としての概念設計への支援を計算機上で実現するために構築する支援環境の詳細について述べる。以下、4.3.1項において、協同作業という観点から見た設計作業の流れに基づいて必要な機能を検討する。4.3.2項では、設計対象構造物に関して協同設計者が共有すべき情報について考察する。また4.3.3項では、工学解析計算を実行する際に必要となる機能と複数の設計者が実行した解析計算結果を蓄積し共有化する方法について検討する。そして、4.3.4項で WINDS の基本的方法とその構成を、4.3.5項で実現した機能とその検証について述べる。

4.3.1 協同作業としての設計

計算機上での協同設計作業を考えるにあたって、まず一般的な協同作業の前提から支援システムに必要なと思われる機能を述べる[10][11]。第一に、常時または適宜の協同作業間でのデータ・情報・知識の交換機構が必要である。ここでのデータは原始的なデータから作業データ、それから生じた意志決定に必要なデータをも含んでいる。第二に、プロジェクトグループ内の合意または総合的判断を決定し、それに反映した作業を始める機構が必要である。協同作業者は作業の各段階において適宜意見交換を行うことがある。そのため、システムには適正で効率的な作業を実現するための階層構造と人を含めた管理体制が必要である。第三に、個々の作業要素を統合した一連の作業の流れ（タスクフロー）や割り当てなどの全体の作業に対する支援管理機能が必要になる。

グループ作業は様々な通信・資料作成・合議などの総合的な結合により達成されるものであり、単一の支援機構だけでは不十分である。例えば、大規模工学システムの典型例である原子炉の開発では巨大な組織の中で様々な部門の専門知識を有する技術者が、互いに密接な関係を持ちながらデータや情報を交換することで知識を獲得し、新たに情報を創造・伝達・保存しながら一連の作業過程のなかで仕事を進めている。WINDS では、宇宙用原子炉を対象とした概念設計段階における協同作業に主眼をおいており、設計作業過程・協同設計者間の意見交換・設計情報の共有などを考察する必要がある。協同設計作業について概念的にまとめたものを図 4-38 に示す。以下では具体的な設計作業の流れと協同作業に必要な協同作業間での意見交換のあり方について考察する。

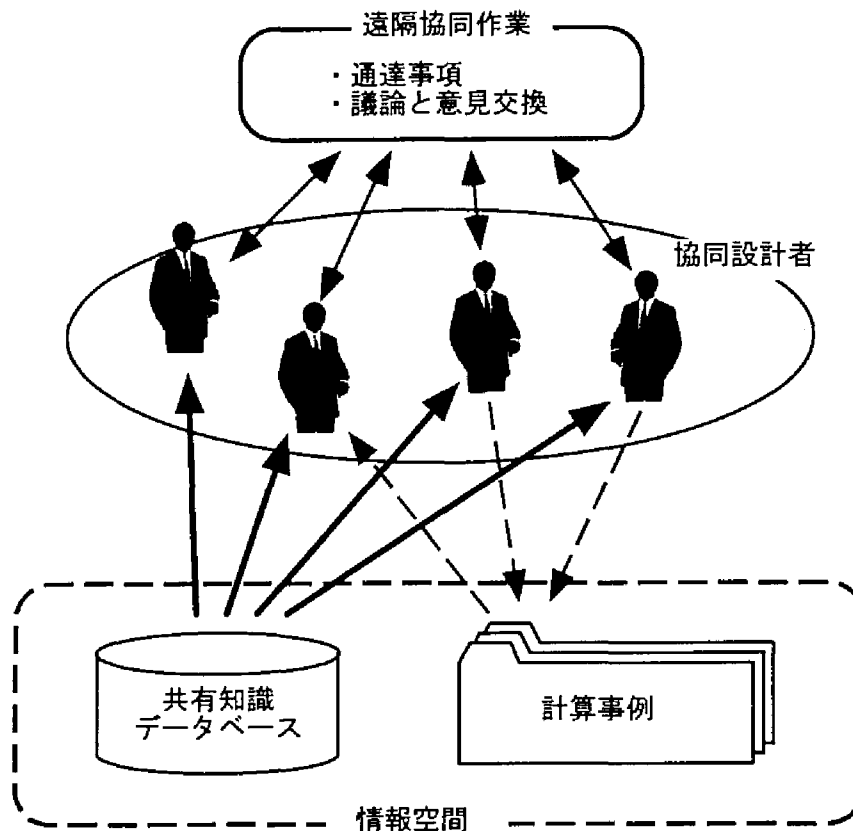


図 4-38 協同設計作業の概念図

4.3.1.1 設計作業の流れ

設計の手順と手法

具体的な設計作業の一例として、機械設計の手順と手法^[12]について述べる。本研究で対象としている宇宙用原子炉の概念設計は機械設計とは若干異なる。しかし、以下に述べる手順は設計工学で行われているものを機械設計に置き直したものであるので一般性は保たれており、本研究での設計手順にも適用できると考えた。機械設計における概念設計は以下の手順の繰り返しによって進められる。基本的な流れは、

1.目的の明確化 → 2.代替案の作成 → 3.シミュレーションの実行 → 4.評価 → 5.最適化

であり、この5項目を概念設計の各段階で意識的に適用していく。設計対象としているシステムは構造的階層を示しているので、1.の目的の明確化の段階では、構想がまとまった段階で最大システム（全体の構成）とそのサブシステムに展開しておき、それぞれのサブシステムでの目的を明確にしておく必要がある。2.の代替案の考え方は、一つの場合だけで設計を進めるのではなく、複数案について比較検討（評価）する必要があるというものである。3.のシミュレーションにおいては代替案の考え方にに基づき、例えば上限値・下限値・中間値といったように複数案を同時に進めていく。どの方法を選ぶかその優劣を判断するのが4.の評価であり、設計者としての決定を下すのが設計の意志決定である。要するに、概念設計段階における意志決定とは、複数の代替案に関していずれの案が最も良いかを決定すること、すなわち、5.の最適化のことである。ただし意志決定をする場合には評価が必要であり、評価基準に経験知識を加味して決定する。評価基準は構想の段階では価格・操作性・信頼性等が基準項目になる。評価項

目は対象によって異なるが初期段階で明確にしておく必要がある。

作業状況管理

設計作業を前述のような一連の手順を繰り返しながら実際に進めていく上で、検討結果や計算結果を記録したり、また手順通りに進められるとは限らず手順の最初に戻って検討することなどが生じる。このような様々なタスクフローを時系列に沿って記録したものに設計ノートがある^[12]。設計ノートは、最大システムを構成する個々のサブシステムごとに記載される。これによってサブシステム設計の部分目標に関する作業状況管理をサブシステムごとに処理することができる。

そこで本研究では、作業状況を管理する設計ノートを計算機上に実現するにあたって、システムの階層構造に対応して記述でき、かつ、分散環境にある複数の設計者が利用できる支援システムとして、インターネットを用いたニュースシステムを適用することを考えた。ニュースシステムを利用すると、それぞれの記事ごとに参照／返信記事を追加記載することができるため、作業の進捗状況に応じて報告を記載できる。例えば、計算入力パラメータを検討する際、ある設計者が仮定条件を提示したとして、別の複数の設計者がそれに応じた結果報告を返信記事として記載する場合などが考えられる。こうして記載されたそれぞれのサブシステムの記事をたどっていけばそのサブシステムの作業状況がわかる。これは元の記事に対して参照／返信される記事が下方に追加されていき、基本的に時系列に沿った設計ノートが作成されるからである。また、通常のニュースシステムのように必要に応じて新規に話題を作成することもできる。設計解析計算に関する情報や支援システムに関する使用方法などを記載することによって、有効な知識が共有化され、作業の効率化につながる。更に複数の設計作業者が様々な記事を追加していくことによって、支援システム自体に知識を蓄積できる。

4.3.1.2 協同設計者間の意見交換

協同作業の基本はそのグループの作業員間の意見交換にある^[10]。仕事の依頼とその仕事に対する必要条件の要求、条件の提示、別条件の提案、進捗状況、不備の指摘、完了報告など多様な意見交換を介して協同作業が進行する。

本研究では協同設計作業を非同期で行うことを目標としており、通常の会議や職場での会話を模擬することは考えていない。しかし、協同設計作業をする以上、設計者は作業する際に必ず何らかの目的をもっており、命令伝達事項や作業過程で頻繁に行われる議論や意見交換を何らかの方法で再現する必要があると考えられる。通常、散在する作業員間の情報交換の手段としては電話・FAX・電子メールが代表的であり、公的または私的に頻繁にやり取りされている。しかし、協同作業ではグループ間での情報の共有化が重要であり、前述のような個対個での情報交換手段は有効ではない。なぜなら個対個でのやり取りした情報がどの程度・範囲まで伝わっているかが管理できないからである。また、複数人配送を行うメーリングリストであってもグループ内の全ての作業員がその伝達事項を了解したのかどうかを確認することは困難である。そこで設計者間の意見交換を計算機上で実現する支援システムが持つ機構として、掲示板と在席管理を行うものが適切であると考えた。

掲示板

本支援システムで設置する掲示板は、支援システムを利用する設計者が確実に一度は目にする場所に掲げられ、その内容としては一般的な議論を掲載することにする。ここで一般的と言った理由は二つあ

る。一つは、設計対象システムのサブシステムごとの議論は前述のニュースシステムでの作業状況報告作成とともに可能であるため、掲示板ではより広範な話題を網羅すべきだからである。もう一つは、ニュースシステムを閲覧しようとする人はその話題に関心があることが条件となるのに対し、一般的な話題であれば、比較的多数の専門家が目にする場所に掲示板を設置することで、彼らが議論を閲覧しそれに参加することができるからである。加えて、掲示板上で様々な専門的観点からの意見を含んだ議論がより活発に行われることを期待するからである。「議論の繰返しを防ぐと同時に意見に対する責任が明確化されるように、議論進行の履歴を保管することは有用である」^[10]ため全ての議論を掲載することにする。

在席管理

伝達事項の通知は協調作業の効率化を図る上で有効である。通知しない場合は各ユーザが自主的に共通のグループ空間を参照する必要がある、それを全員に徹底することは困難である^[10]。

本支援システムでの在席管理機構は、グループ内の各作業員について支援システムを利用し始める時刻と利用を終えた時刻をそれぞれ記録することで実現する。本研究では協同作業員が非同期で支援システムを利用することを前提としているため、例えば同期的な意見交換を行うために端末に向かっているかどうかを確認する在席管理は必要でないと考える。命令伝達事項を了解したかどうかの確認のために伝達側がこの在席管理機構を利用することが考えられる。

4.3.2 設計共有情報の表現

本項では複数の協同設計者が共有すべき設計情報の計算機上での表現について考察する。概念設計のような知識集約型の作業を支援するためには、対象に関する重要な情報を計算機上に系統的に表現し、不必要な情報は逆に隠蔽する必要がある。表 4-1 で分類した基本設計モデルのうち共有すべき設計情報を以下に挙げる。

1. 基本部品と複合部品の形態と配置情報
2. 構成部品の階層構造
3. 部品の機能情報
4. 実体構造と機能情報との対応関係
5. 全体設計目標の部分目標への階層的展開

以下の4.3.2.1では、上記の共有すべき設計情報を計算機上に可視化する際に設計対象物のサブシステムごとの機能と実体構造の関連性を考察し、4.3.2.2では、上記の 1.の中でも特に部品の形態情報を可視化する際に実体構造物の柔軟な立体的表現を検討する。

4.3.2.1 機能と実体間の関連性

本研究においては、4.2.2.2で述べたようにまず原子炉の各サブシステムを構成する各部品の様々な情報に注目し、宇宙用原子炉全体を最大システムとした複数のサブシステムごとに取り扱うことにし、原子炉全体システムはサブシステムを組合せた階層構造として表現する。WINDS では、VINDS の場合と同様に、このような機能の階層構造を包含したサブシステムの階層図を計算機上に表現することでその関連性の理解を支援する。しかし、単に階層図を表示するだけでは柔軟な支援が行われているとはいえない。例えば設計パラメータの変更によりサブシステムの部分目標の達成が阻害されるような場合が

考えられるため、機能の階層構造の表現の中でその影響が検討可能である必要がある。

4.3.2.2 構造物の立体的表現

次に、前述した共有すべき設計情報を計算機上で可視化する際に、サブシステムの階層構造における部品実体構造物の柔軟な表現方法を考察する。本研究で対象にしている宇宙用原子炉は現在設計段階にあるため、実物は存在しない。しかし、設計支援システムにおいて対象物体の実体構造物の表現は、直観的理解を促進させるため立体感を持ったものであることが望ましい。WINDS では、VINDS と異なり仮想現実感技術を利用していないため、ある程度の制約が発生する。そこで、実体構造物の立体感のある柔軟な表現として、立体視はできないにしても、3次元モデルによる表現方法を検討する。更に、3次元モデルによる表現はただ眺めるだけの静的なものではなく、その実体構造を詳細に観察するために様々な操作を可能とすることが望ましい。よって、実体構造物を表現する上で支援システムは、単に3次元モデルを表示するだけでなく、VINDS の場合と同様に次のような機能を実現する事を目指す。

1. 概念設計段階において、設計者は柔軟な視点の移動ができるようにする。なぜなら、例えば、部品の細部を拡大してみたい場合や部品の裏側の構造を見たいというような場合に、様々な視点から設計対象を見る必要が生じるからである。
2. 設計者は工学構成部品の形状を詳細に渡って理解するために工学構造物を様々な階層で捉えることがある。全体像から部品レベルまでの詳細度の異なる対象を捉える時に、自由に対象を検討できる環境が必要となる。
3. 支援システムは、内部の構造を理解するために外部の構造物をはぎ取るような操作を実現する。これにより設計者は、構想図の中でしか存在しない対象設計物を実際に存在するかのように把握することができ、実体構造物に対する視覚的なイメージを確立することができる。

以上、実体構造と機能の関連性の理解は概念設計過程において最も重要なものの1つである。支援システムは、どの実体がどの機能を実現しているのか、また、どの機能がどの実体により実現されているのかという双方向の関連情報を、設計対象の3次元モデルを含めて柔軟かつ系統的に提供する。

4.3.3 工学解析計算への支援

本項では、宇宙用原子炉の炉心設計に必要な工学解析計算に関して、設計支援システムが支援すべき機能について考察する。

概念設計段階において表 4-1で分類した基本設計モデルのうち、専門分野の観点から解析計算を実行する設計者がグループ内での合意として持っていなければならない知識を以下に挙げる。

- 個々の設計目標に対応する機能要求と工学解析モデルとの対応関係に関する知識
- 設計問題を解決するための解析作業に関する知識

これらをふまえた上で、概念設計のような試行錯誤的な設計作業過程は以下の4段階で行われる。

1.扱うべき設計モデルの作成 → 2.モデルによる設計工学解析計算
→ 3.計算結果の評価 → 4.評価に基づくモデルの修正

この設計作業過程は一度で終了するわけではなく、通常は設計者が専門分野の観点から見て満足 of いくまで繰り返し行われる。従って、一連の設計作業過程を効率よく進行するために、設計者にとって、支援システム全体が操作しやすく、設計入力画面や計算結果等の表示がわかりやすいものである必要がある。

以下では、実際に工学解析計算を実行するときに必要な支援環境の整備を述べた後、設計問題を解決するための設計モデルを作成する際に、有効な示唆を与えられる過去の蓄積計算事例の検索手法について述べる。

計算実行支援環境の整備

本研究では、4.1.3項で述べたように TFE 計算と SRAC 及びこれらを複合した収束計算の 3 種類の工学解析計算が炉心設計に必要である。設計者は、支援システムにおいて、それぞれの解析計算に必要な設計入力パラメータを設計作業が容易にできる GUI を利用して設定できるようにする。ここでは主に設計者に専門分野の観点から実行する解析計算を選択させ、各解析計算に対応した設計入力を行うことになる。例えば炉物理専門の設計者が核計算を行って感度解析を試みるなど、設計解析の進め方は設計者によって多種多様であるため、様々な局面に対応した設計支援を提供する必要がある。

支援システムは、設計入力パラメータの変更とそれに伴う解析計算用入力ファイルの作成、解析計算の実行、計算結果の表示という一連の過程を、他の独立した環境での操作なしに同一支援環境内において実現されることが望ましい。

計算結果については、選択した工学解析モデルに対応した出力を設計者に理解しやすいような形式で表示することが求められる。単に数値データとしての計算結果をそのまま表示するだけではなく、わかりやすい形式で設計者に提供することを目指しており、計算結果の可視化についても工夫する必要がある。数値データをグラフ化する際に考えられることとして、グラフが複数個ある時に一見してどのようなものに関連したグラフかを設計者に分からせるために、例えば、温度のグラフであれば温度計のメタファを利用することなどが考えられる。炉心内の空間分布である熱出力密度分布などの計算結果は 3 次元グラフで表現することも考えられる。

また、解析計算の処理過程において、設計入力または出力結果に制約違反が生じた時には、支援システムが判断し設計者側に警告を表示するような知的な結果提示が必要である。

4.3.3.2 蓄積事例の類似性検索

前述のように、設計解析計算に関して、設計パラメータの変更・解析計算実行・影響の評価という一連の過程は、一度で終了するわけではなく、通常は設計者の満足 of いくまで繰り返し実行される。計算を実行する時には複数の専門家による協同作業を想定しており、複数の設計者が各々繰り返し解析計算を行うわけであるから、サーバ側の計算負荷が高まるのは必至である。解析対象の複雑さと解析計算を行う計算機の能力に依存している以上、それぞれの解析計算に多大な時間がかかるのは避けがたい事実である。解析計算にかかる時間を最小限に抑えるため、別の設計者が同種の計算を実行することを避けるための機構が必要である。本研究では、過去に実行した解析計算を事例として蓄積し、それらを検索・参照できる機構を考えている。更に、4.3.1.1で述べたように工学解析を行う段階での設計は代替案を常に念頭におき最適化を行うものである以上、様々な事例を参照することで効率よく設計作業に取り組むことが期待できる。

検索機構

WINDS では、解析計算実行段階において個人の作業環境を整備するだけでなく、複数設計者による協同作業を意識した作業環境を提供する。そこで、各分野の専門家が何らかの意図をもって解析計算を実行した時の入力パラメータと計算結果の組を一組とした計算事例をサーバ側に蓄積・共有化することにする。これにより他の設計者はサーバにアクセスすることで過去の解析や他の設計者の事例を参照できる。

事例検索機構は、設計解析計算の入力パラメータと出力結果に対応する生成型のルールを抽出することが困難であるため、事例ベース推論手法^[13]を応用した類似性の評価方法を適用することにする。この利点として以下のことが挙げられる。

- 類似事例検索により、実際に解析計算を行うよりもはるかに短時間で類似計算事例を見つけることができる。
- 設計結果がそのまま事例として記憶されるので、知識獲得コストが少ない。
- 成功事例を再利用するため、設計結果の信頼性が高い。

事例は、工学解析計算における入力パラメータとその計算結果の組と4.3.3.3で後述する設計への注釈で構成される。各設計パラメータに完全に合致していないデータを入力として検索した場合であっても、設計者に過去の類似の事例とその計算結果を複数提示することで設計者に類似の事例を評価させることにする。類似事例検索の際に検索結果を複数表示することは、実際の計算を実行する時のように 1 つの計算結果を評価するよりも、特定のパラメータについての計算結果に対する感度がわかる点や別の複数の入力パラメータについての見解も得られる点から有効である。

類似性検索のための特徴付け

類似性検索における事例の特徴記述については、問題解決に関連する属性を用いて必要かつ十分な特徴付けがなされなければならない。また、蓄積された事例の中から最も問題解決に貢献すると見られる事例を検索するためには、検索入力値と事例との間での属性名と属性値の一致及び不一致の程度を何らかの方法で尺度化することが必要である。例えば、設計入力パラメータについて構成部品寸法のように連続的なパラメータばかりでなく、核燃料・冷却材の材料選択のように不連続なパラメータにも特徴付けを行うことが必要である。類似性検索のための特徴付けの機構には、4.1.4項で述べた解析計算の結果として得られた知識を適用するのが有効な手法であると考えられる。

以下では、類似性検索のための特徴付けについて考察する。類似性検索機構は、対象とする工学解析計算を TFE 計算と SRAC の複合収束計算に限定する。その理由は、複合収束計算は実行に最も時間を要し、TFE 計算における平均発電効率入力などの仮定を用いずに機器構造や材質に関する設計パラメータだけを与えて、熱伝導計算と炉心核計算の双方の入出力結果から収束した結果を求めているため、設計入力パラメータと計算結果が一对一の対応関係を示しているからである。複合収束計算のための設計入力パラメータは表 4-5 に示す通りであり、それらの選択され得る選択肢または解析経験から得られた概略値は表 4-9 に示す通りである。

表 4-9 複合収束計算の入力パラメータの概略値

入力パラメータ	種類・数値について
<i>fuel</i>	UO ₂ ・UN
<i>coolant</i>	NaK・Na・Li
<i>v</i>	1.0 m/s 前後
<i>T_{in}</i>	1000 K 前後
<i>power</i>	100 kW
<i>n</i>	TFE ピンの列数に依存する*
<i>hole</i>	有無
<i>r₀ - r₆</i>	0 - 1.0 cm
<i>R₂</i>	2.0 cm 前後
<i>D</i>	8.0 cm 前後
<i>Z₁</i>	10.0 - 30.0 cm
<i>Z₂</i>	4.0 cm 前後
<i>Z₃</i>	2.0 cm 前後

*TFE ピンの列数が 5・6・7・8・9・10 列の時、炉心部にはそれぞれ 91・127・187・241・301・367 本の TFE ピンが入る

4.1.4項で述べたように、計算目的として平均発電効率を向上し実効増倍率を大きくする設計入力パラメータについてまとめると、表 4-10 のようになる。

表 4-10 解析計算結果から得られた知識

設計パラメータ	得られた知識
<i>fuel</i>	UN
<i>coolant</i>	Li
<i>v</i>	低
<i>T_{in}</i>	高
<i>r₁</i>	大
<i>r₂</i>	小
<i>r₄</i>	小
<i>r₅</i>	大
<i>r₆</i>	小

類似性評価関数の定義として、入力に対して検索事例が完全に一致する場合を最小値 0 として、差異が見られる度に point を加えていくことにする。各設計入力パラメータごとに、それぞれの検索入力について表 4-11・表 4-12・表 4-13 に示すような類似性評価関数で評価することとする。

表 4-11 知識を適用した特徴付け(1)

入力パラメータ	類似性評価関数 (入力に対して)
<i>fuel</i>	異なれば+ 25 point
<i>coolant</i>	異なれば+ 50 point
<i>v</i>	(差の 2 乗) × 5 point
<i>T_{in}</i>	(差の 2 乗) / 100 point
<i>power</i>	(差の 2 乗) / 5 point
<i>n</i>	(差の 2 乗) × 5 point
<i>r₀</i>	(差の 2 乗) × 50 point
<i>r₁</i>	(差の 2 乗) × 300 point
<i>r₂</i>	(差の 2 乗) × 100 point
<i>r₃</i>	(差の 2 乗) × 100 point
<i>r₄</i>	(差の 2 乗) × 100 point
<i>r₅</i>	(差の 2 乗) × 50 point
<i>r₆</i>	(差の 2 乗) × 200 point

表 4-12 知識を適用した特徴付け(2)

入力パラメータ	類似性評価関数
<i>r₁ - r₀</i>	((事例の燃料幅)-(入力の燃料幅)) × 60 point
<i>r₅ - r₄</i>	((事例のコレクタシース間のギャップ幅)-(入力のギャップ幅)) × 30 point

表 4-13 知識を適用した特徴付け(3)

入力パラメータ	類似性評価関数
<i>r₂ - r₁</i>	((入力のエミッタ幅)-(事例のエミッタ幅)) × 20 point
<i>r₄ - r₃</i>	((入力のコレクタ幅)-(事例のコレクタ幅)) × 50 point
<i>r₆ - r₅</i>	((入力のシース幅)-(事例のシース幅)) × 50 point
<i>v</i>	((入力の冷却材流量)-(事例の冷却材流量)) × 80 point

まず表 4-11では、各設計入力パラメータごとに入力する数値の桁数が異なるため、評価関数出力の桁数を統一するように関数を設定する。TFE セルの部分によって寸法の重みを変えているのは、平均発電効率向上のために燃料幅と TFE セルの外径が特に重要だからである。

表 4-10中に示されているように、燃料幅とコレクタとシース間のギャップ幅についてはより大きい方が計算目的に沿う。特徴付けに際してはそれを踏まえて、検索されやすいような評価関数を設定する。表 4-12に示すように、例えば燃料幅の特徴付けについては、蓄積事例の設計パラメータ中の燃料幅から検索入力の燃料幅の差が正になる時に検索条件に合う、すなわち、評価関数の値が小さくなるように重みを付ける。差が負になる時は絶対値をとって 2 倍の重みを付け、評価関数の値が大きくなるようにする。

表 4-13に示す設計パラメータ群は上記と逆のことが言える。つまり、検索されるべき事例はこれら

の対応する設計パラメータが小さいものが目的に沿うため、検索入力と蓄積事例との差が正になる時に検索条件に合うように評価関数を設定する。

燃料部の高さ・ベッセルドラムの厚み・回転反射体直径・上下の反射体／吸収体などの炉心サイズに関するパラメータについては、炉心サイズは小さい方が目的に沿うため、それぞれの検索入力パラメータに比べて蓄積事例のパラメータが大きい場合に、評価関数の値が小さくなるように評価関数を設定し、炉心サイズが小さい事例が検索されるようにする。

4.3.3.3 設計への注釈とその検索

設計者が専門分野の視点で設計対象を解析する場合に、その設計意図は他の専門分野の設計者からすれば説明を要する可能性があるので、設計への注釈付けは協同作業支援の観点から有効な手法である[14]。また、設計の論理的根拠（設計理由）を記録することにより、保守や再利用の際の理解を助け、改訂の際の手直しの重複を防ぎ、重要な設計上の意思決定とそうでないものとの区別をつけることもできる。しかし、記録された設計理由の記述方法に統一性がなく膨大なものになると、記録・蓄積はされたものの後から参照できなくなり、注釈付けは無意味なものになってしまう。そこで本支援システムでは、解析計算を行う設計者が専門分野・計算意図を限られた選択肢から注釈付けを行い、かつ、それらを検索・参照できるような機構を有する必要がある。

また、設計への注釈付けと検索を用いることで、複数設計者による協同作業に限らず、個人の設計者の支援も行うことが可能となる。設計が長期にまたがると、過去に自分が設計した事例であっても、なぜ、いつその様な設計を行い、それに対してどう評価・変更したのか、などの情報が必要になる。このように個人もしくは複数人の過去の設計事例を用いて、設計者個人の設計進行過程にフィードバックをかけることは、大規模な工学システムの概念設計において様々な工学解析計算を行う際に分散しがちな設計者の理解を各設計進捗段階ごとに集中して深めていく上で、有効な支援方法であると考えられる。

本研究では注釈の項目として以下のものを設定する。

- 専門設計分野： 核設計・熱設計・構造設計・安全制御設計 の4選択肢
- 設計計算： TFE 計算・SRAC の2選択肢
- 計算全体の着目点： 熱出力・発電効率・原子炉制御・安全性・経済性 の5選択肢
- 入力パラメータについての着目点： 燃料ペレットの種類・冷却材の種類・燃料の中心空孔の有無・TFE ピンの列数・中心空孔の半径・エミッタ・コレクタ・シース・冷却材流速・冷却材入口温度・ベッセルドラムの厚み・回転制御ドラムの直径・TFE ピンの燃料部の高さ・上部／下部反射体の厚み・上部／下部吸収体の厚み の15選択肢（複数可）
- 計算出力結果についての着目点： 燃料中心温度・冷却材出口温度・平均発電効率・炉心実効増倍率・熱出力密度分布 の5選択肢（複数可）

これらの各事項の中から単数または複数項目について選択し、実行する設計計算に関して設計者がどの項目に着目しているかを明示できるようにする。これによって、解析計算目的と着目点を明確にし、事例の検索を容易にする。また、上記以外の項目や一般的なコメントについては自由文の入力部分を設け、より柔軟な設計への注釈付けを可能にする。

4.3.4 WINDS の基本的方法とその構成

本研究で構築する設計支援システムの機能は以下の 3 つに大別される。

1. 複数設計者間の意見交換を支援する協同作業としての概念設計への支援環境の提供
2. 対象物の構造部品と機能との関連性・構成部品の 3 次元表示を含む対象構造物の階層表現による構成部品関連情報の提供
3. 設計解析に必要な工学解析計算の選択・計算実行依頼・計算結果の表示を行う解析計算支援機能の提供

本支援システムでは、設計者が設計作業を行う時に対峙するインタフェースを変更することなく、様々な設計支援機能を支援システム側が「統合的」に扱い、設計者に情報・知識を提供することが望ましい。そこで、協同設計を支援するための情報管理を WWW サーバが一括して行い、複数の設計者はインターネットに接続された個人の PC 等の計算機上の WWW ブラウザに向かうだけで支援システムが提供する全ての支援提供を享受しながら設計作業を行うことができるような支援システムが必要である。本研究では、このような WWW サーバを中心とする統合型設計支援環境 WINDS を構築した。WINDS は、設計に必要な機能を実現するための計算機資源の集中的な管理を行う WINDS-server を中心として、設計者（WINDS-clients）がインターネットに接続された計算機上の WWW ブラウザに向かって概念設計作業を行うクライアント／サーバ方式に即したシステム構成となっている。システム構成の詳細を図 4-39 に示し、以下で説明する。

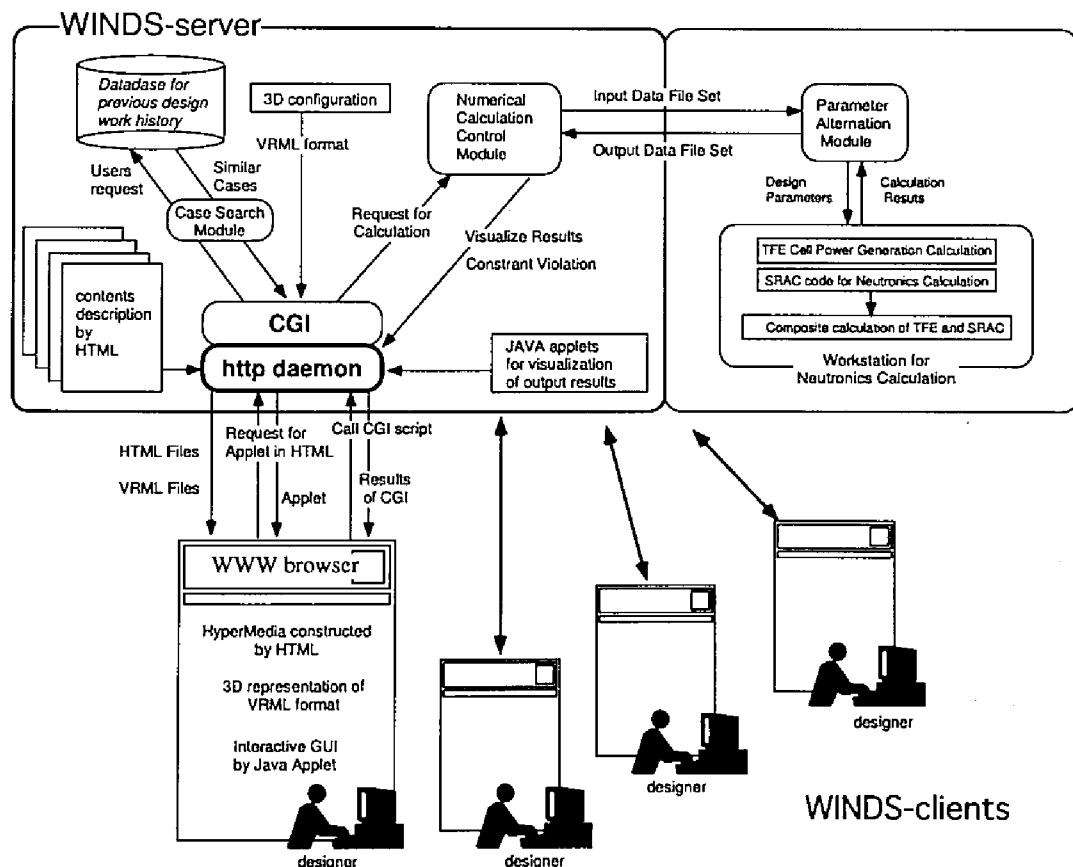


図 4-39 WINDS システム構成

WINDS-server においては、WWW 上でのプロトコルである HTTP(HyperText Transfer Protocol) を走らせるデーモンプロセスとクライアントが通信する時に設計支援内容を構成する WWW の要素技術と、主として解析計算への支援を実現し HTTP デーモンが管理する CGI(Common Gateway Interface)処理とが主要な役割を果たしている。計算機環境としての WINDS-server は、HTTP デーモンが動作している WWW サーバ計算機だけではなく、工学解析計算用の計算機資源をも含んでいる。種々の協同設計支援機能を実現する WINDS-server 内の多数のモジュールプログラムのうち、ほとんどは WWW サーバ計算機上で動作するが、解析計算については WWW サーバ計算機で動作しているモジュールが解析用計算機に計算実行を依頼することで、解析用計算機上で動作する。WWW サーバ計算機と解析用計算機を分けた理由は、将来、工学解析計算の種類による計算機資源の制限や WWW サーバ計算機の制限など、広範な状況に対応できるように支援システムを設計したためである。WINDS-clients 側で必要なのは、インターネットに接続された PC 等の計算機と支援内容を表示する WWW ブラウザ及び設計作業を行う時に用いるマウスだけでよく、特別な資源を必要としない。WINDS の主な機能は WINDS-server 上で実現されているため、以下では、WINDS-server での各種の WWW の要素技術と CGI 処理について説明する。

4.3.4.1 WWW の要素技術

ここでは、支援システムを構築するために用いた WWW の要素技術として、HTML・VRML・Java/JavaScript について簡単に説明する。

HTML

設計者が対峙する WWW ブラウザ上で表現される設計支援内容は主に HTML (HyperText Markup Language)で記述されている。HTML は WWW サーバに情報を登録するための記述言語であり、他の文章へのリンクだけでなくハイパーメディアとして画像や音声等へのリンクを可能にしている所に特徴がある。設計者間で共有すべき情報や計算結果の表などの文字・数値情報と設計対象物の概念図や構造物の構造平面図など、設計者に提供する静的な情報はほとんど全て HTML で表現される。また後述する CGI や Java によって実現される機能も HTML から呼び出されるため、WWW ブラウザと HTTP デーモンとの情報交換において HTML は必要不可欠な要素技術である。

VRML

構成部品に関する情報提供において、3 次元モデルは HTML の 3 次元版ともいえる VRML (Virtual Reality Modeling Language)を用いて記述され、WWW ブラウザ上に表示される。CAD 等で構成した 3 次元モデルを VRML を用いて記述することによって、設計者の要求に応じて、WWW ブラウザの画面上で 3 次元モデルを動的に移動・拡大縮小し、視点を移動することで、対象物体の構造の詳細を把握することができる。また VRML では、表示されている 3 次元モデル自体にリンクをはることができる。これを用いて、ただ対象物体を眺めるだけではなく、設計対象物の内部部品を見たい時に外部部品の一部を取り除くといった動作を実現することができ、人間の空間知覚に即した操作環境が構築できる。

Java/JavaScript

Java と JavaScript は開発経緯は異なるが、どちらも WWW ブラウザ上で設計者とシステムの対話

的な動作を実現させることができる。Java/JavaScript を利用することで、WWW ブラウザ上において設計者がマウスを用いるだけで作業ができるといった容易な操作が可能である GUI を構築することができる。Java アプレットは、サーバとは通信せずにクライアント側の計算機資源を用いているため、クライアント側で設計者の操作に応じて動的で対話的な処理が可能となる。

4.3.4.2 CGI 処理

本項では、CGI 処理とこれを利用して実現する支援機能について述べる。CGI (Common Gateway Interface) は、WWW ブラウザにおいてユーザの要求に応じて WWW サーバ上でプログラムを実行し結果を再びユーザに返すという柔軟な対話操作ができるように考案されたものである。

設計作業は、設計者の要求に応じて動的かつ対話的に処理されることが望まれる。HTML と VRML は WWW サーバ側に静的に記述されたデータであるため、設計者の変化する要求に柔軟に応じることができない。また、Java/JavaScript を用いて対話的環境を構築するためには、クライアント側の計算機資源を用いてそれを実現している。しかし、工学解析計算のように複雑で多大な処理を要する計算を実行できる計算機資源は限定されており、クライアント側として PC 等を想定している計算機資源で実現できるわけではない。実際のところ計算能力の問題以外にも、多数のライブラリから構成され大量のデータを有した炉心核計算のような計算コードをクライアント側で利用するには、クライアントの計算機資源に実装するための計算コードとの整合性が必要であり、実現不可能であると思われる。すなわち、WWW サーバ上でのデータ処理には CGI 処理が適しており、クライアント上でのデータ処理には、Java/JavaScript が適しているといえる。

そこで HTML から呼び出される CGI 処理を利用して、WWW サーバ側で外部プログラムを起動させサーバ側で利用できる計算機資源を用いることにより、工学解析計算実行などクライアント側では実現不可能な要求に対処することにする。更に CGI 処理を用いる利点として、VRML が CGI 処理を用いることで対話的な 3 次元モデルの構築・変更が可能であることと、Java でグラフを作成する時に計算結果として返されるデータの一部分を整理して、作成するグラフのパラメータとする処理が実現できることも挙げられる。

通常 WWW サーバが管理する CGI プログラムは、HTML からの要求に対して何らかの処理を行い、その結果を返すことになる。WINDS-server における CGI プログラムが管理するモジュールプログラムの主なものとして、次に述べる解析計算制御モジュールと設計事例検索モジュールがある。

解析計算制御モジュール

設計者は、工学解析計算を実行する時、炉心設計に必要な TFE 計算と SRAC の解析計算とそれらの複合収束計算の 3 種類の工学解析計算に対応した入力パラメータを、WINDS-clients 側において WWW ブラウザ上に JavaScript で作成された GUI を用いて、マウス操作で設定することになる。設計者が計算実行を依頼すると、解析計算制御モジュールは、図 4-39 の右上に示すように、3 種類の解析計算のそれぞれの設計パラメータの設定に対する解析用入力ファイルの作成を行い解析計算を実行するという一連の過程を担当する。解析用計算機においては、パラメータごとに別々に構成されているパラメータファイルを用いてそれぞれの解析計算に対応した設計入力ファイル（以下、入力ファイルと呼ぶ）を作成する必要がある。WWW サーバ計算機で実行される解析計算制御モジュールは以下の処理を順に行う。

1. 入力された設計パラメータからパラメータの種類ごとのパラメータファイルの作成
2. WWW サーバ計算機から解析用計算機へのパラメータファイルの転送
3. 解析用計算機上での計算実行処理、即ち、パラメータファイルから入力ファイルを作成するプログラムの実行と実際の解析計算の実行
4. 解析用計算機上において、膨大な計算結果群から必要な結果だけを抽出し出力ファイルを作成する処理プログラムの実行
5. 解析用計算機から WWW サーバ計算機への出力ファイルの返送
6. 制約条件違反表示を含めた計算結果の表・グラフの表示などの計算結果の処理

設計事例検索モジュール

設計事例検索モジュールは、計算事例についての類似性検索機構を実現する類似性検索モジュールと設計への注釈による検索機構を実現する注釈検索モジュールがある。

類似性検索モジュール

類似性検索は、4.3.3.2で述べたように対象としている工学解析計算を炉心設計に必要な TFE 計算と SRAC の複合収束計算としている。類似性検索機構は、解析計算の各設計パラメータを検索のための入力として、蓄積された事例の中から最も類似度が高い、すなわち、設計への問題解決に貢献すると見られる事例を検索する。

計算実行の時と同様に設計者は、WWW ブラウザ上に実現された GUI を用いたマウス操作で、検索入力条件を入力をすることになる。検索条件となる設計入力パラメータは、複合収束計算実行時の設計入力パラメータと同様である。類似性検索モジュールは、WWW サーバ計算機に蓄積された過去の設計事例を検索条件と照合する処理を実行する。その際、検索条件と個々の比較対象事例に対して4.3.3.2で述べた特徴付けを行い、類似度を評価している。類似度が高いと判断された複数の事例は、類似性検索モジュールによって一覧表が作成される。

注釈検索モジュール

一方、設計への注釈による検索機構は、計算事例を検索対象としている点で類似性検索機構と共通であるが、検索対象を限定された項目としている点から検索の仕組みが類似性検索機構と著しく異なっている。設計への注釈による検索機構は、設計への注釈付けと密接に関連している。すなわち、設計への注釈付けは、WINDS-clients 側において WWW ブラウザ上で4.3.3.3で述べたような複数の選択肢の中から着目点を選択する。注釈検索モジュールは、設計者が選択した項目と注釈のついた事例を照合し、一致したものを複数表示する。計算結果の表示に関しては、表形式を用いて類似性検索機構の結果表示と同様の一覧表を作成し、設計注釈の参照に関しては、各々の事例を直接表示する形式をとる。

4.3.5 WINDS の機能とその検証

統合型設計支援システムは、設計者が様々な支援環境を自由に行き来できる柔軟なものであり、設計者と支援システムとのインタフェースの観点から4.3.4項で述べたように設計支援機能を、協同作業支援・構成部品関連・解析計算関連の3つに分類される。

本研究で構築した統合型設計支援システムでは以下の機能を実現した。

- 協同作業支援環境
 - ニュースシステムを用いたサブシステムごとの作業状況管理
 - 通達事項を掲示する掲示板と伝達確認のための在席管理機構
- 構成部品関連支援環境
 - 設計対象物のサブシステムの機能と実体間の関連を示す階層構造図と文字情報提供
 - 設計対象構成部品ごとの2次元概念図と3次元モデルの柔軟な表現
- 解析計算支援環境
 - TFE 計算・SRAC・複合収束計算の3種類の解析計算とそれぞれの結果表示を行う GUI 環境
 - 複合収束計算入出力結果の蓄積事例に対する類似性検索機構
 - 設計蓄積事例に対する注釈付けとその検索機構

本項では、実際に構築した統合型設計支援システム WINDS の支援機能である協同作業支援・構成部品関連支援・解析計算支援をそれぞれ4.3.5.1・4.3.5.2・4.3.5.3で説明し、最後に4.3.5.4で作業例について述べる。

設計者が WINDS を利用するためには、以下の条件を満たす WWW ブラウザを用意するだけでよい。

WINDS-client として推奨する WWW ブラウザとしては、Java 対応のブラウザ (Netscape Navigator Ver3.0 等) であり、更に VRML 形式の3次元モデルを表示するためには対応するプラグインが必要になる。上記の条件を満たす WWW ブラウザは PC や WS 上の多くの OS で入手が可能である。

実際に WINDS を利用するにあたって最初に目にするのは図 4-40 の画面である。設計者は、図 4-40 において自分の名前を入力し、マウス操作で 'Present' をチェックし 'SUBMIT' ボタンを押すと、図 4-41 に示す受付完了の画面になる。

The screenshot shows a Netscape Navigator browser window displaying the 'WINDS Reception' page. The browser's address bar shows 'http://www.mitsubishi.com'. The page has a standard Netscape interface with a menu bar (File, Edit, View, Go, Bookmarks, Options, Directory, Window, Help) and a toolbar with icons for Back, Forward, Home, Reload, Stop, Open, Print, Find, and Mail. Below the toolbar are links for 'What's New?', 'What's Cool?', 'Destinations', 'Net Search', 'People', and 'Software'. The main content area is titled 'WINDS Reception' and contains a form with the following elements: a 'Name:' label, a text input field containing asterisks, a radio button group with 'Present' (selected) and 'Absent' options, and 'SUBMIT' and 'CLEAR' buttons.

図 4-40 WINDS の開始画面

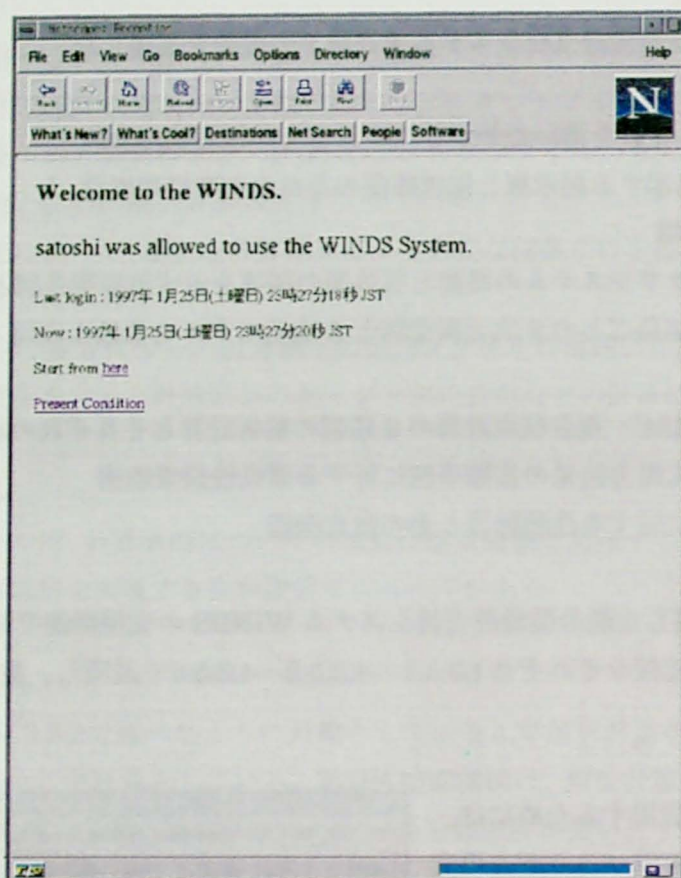


図 4-41 WINDS の受付完了の画面

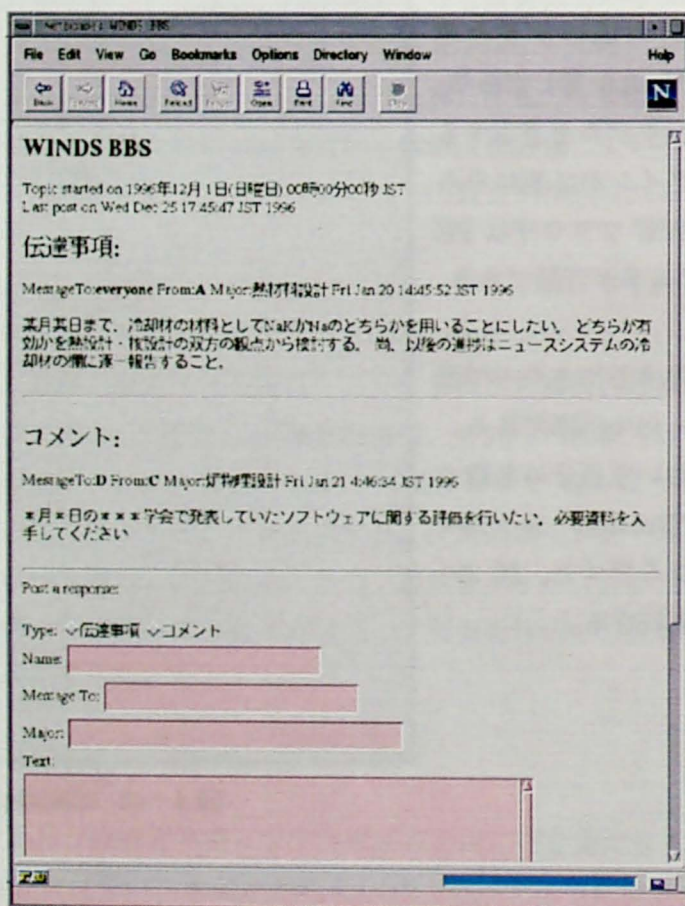


図 4-42 掲示板の画面

次いで図 4-41で、‘here’をクリックすれば WINDS を利用できるが、他の設計者の利用状況を確認することもできる。設計者が WINDS 支援機能を利用する最初の画面は、4.3.5.1 で後述する図 4-42の掲示板の画面である。ここで自分宛の通達事項がないかどうかを確認する。

掲示板の最下部にある ‘menu’ ボタンを押すと、図 4-43に示す様なメニューのウィンドウが独立に作成される。メニューは WINDS を利用している間、常時表示されているため、設計者は必要な支援機能を随時利用できる。設計者は、以下に述べるような支援機能を自由に利用して、協同作業としての概念設計作業を円滑に進めることができる。

4.3.5.1 協同作業支援

本支援環境は、協同作業としての設計を支援するための機構を整備したものであり、4.3.1項で述べた機能を実現している。

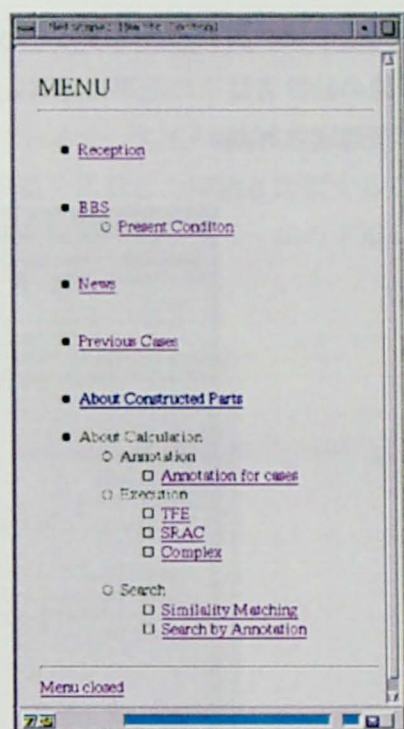


図 4-43 WINDS のメニュー画面

ニュースシステムを用いた作業状況管理

作業状況管理への支援機構は、4.3.1.1で述べた機能を実現しており、設計対象の各サブシステムにおける作業状況を管理するために、インターネット上でのニュースシステムを用いて設計ノートを模擬したものを設計者が協同で作成できるようにした。図 4-44はニュースシステムの機能の一つである、過去の記事の一覧であり、対象の階層構造に対応して過去の記事の題目が階層構造を構成している。

設計者は、図 4-44に示す画面から適当な題目をクリックすると実際に記事を参照できる。また図 4-45の画面では、それぞれの記事に参照／返信記事を追加記載することができる。そして重要だと思われる内容に対しては記事の題目を工夫してそれとわかるようにするだけで良い。例えば、あ

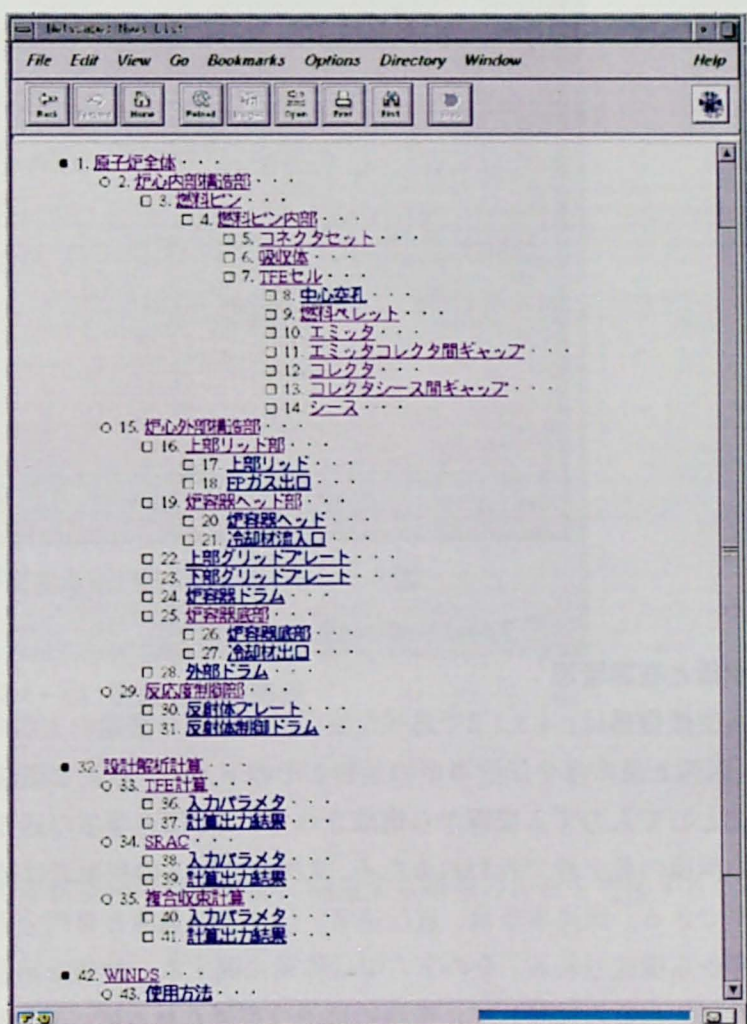


図 4-44 ニュースにおける記事の一覧の画面

るサブシステムの設計モデルについて設計者が仮決定事項を提示して題目にそれと掲示し、グループ内の他の設計者はその記事に返信記事を投稿することで議論を行い、最終的に本決定に至るという場合などが想定される。

The screenshot shows a Netscape browser window titled "Netscape: WINOS BBS". The menu bar includes "File", "Edit", "View", "Go", "Bookmarks", "Options", "Directory", "Window", and "Help". The toolbar contains icons for Back, Forward, Home, Reload, Stop, Open, Print, Find, and a logo. The main content area displays a forum post with the following details:

- You followed/replied this article:**
- Name:** B
- Subject:** 質問
- Text:**
 - > 1997年1月29日(水曜日) 23時15分35秒 JST に書きました:
 - > 冷却材の流れによって炉心内の熱を除去することは理解した。
 - > 冷却材の流速を上げることで更に冷却効果が上がるはずだ。
 - > しかし、その冷却材流速を上げるにはどのような機構で実現するのか。

Below the post, there is a "Please Input form" section with the following fields:

- Name:** A
- Title:** Re: 質問
- Text:**

冷却材流速を上げるために電磁ポンプを用いることで理論上は
いくらでも流速を上げることが可能だ。

しかし、流速上昇が物質の粘性等の影響により流体力学的にど
のような効果を与えるかは、機械設計の専門家と相談して、
TFEポンプや炉心内部ドラムを構成している材質に加えられる圧
力などを調べなければならない。

図 4-45 ニュースにおける返信記事記載の画面

掲示板と在席管理

本支援機構は、4.3.1.2で述べた協同設計者間の議論の支援を実現する。図 4-42に示すように掲示板は、画面上部の命令伝達事項の通知とその下方の一般的な議論を掲載する機能および下部のそれらを自由文として入力する機構から構成されている。伝達事項の通知は支援システムを利用し始めるときの最初の画面の最上段で行われるため、支援システムの利用者は確実に他の設計者からの伝達事項を知ることができる。伝達事項は、被伝達者、伝達者の名前と専門分野、伝達事項を掲載した時刻、伝達事項の内容から構成される。その下方では作業に関する一般的な議論を掲載している。伝達事項は必ず他の作業者に伝わるのに対して、議論の掲載は更新される度に下方に付加される。

伝達事項を掲載した作業者は、伝達事項を対象作業者が参照したかどうかの確認のため、在席管理機

構を利用することができる。在席管理の画面は、図 4-46に示すように、プロジェクトグループ全員について支援システムの出欠席状況を表示している。

各作業者について、出席の場合はいつから支援システムを利用しているか、欠席の場合には最後に支援システムを利用した時刻を示している。これにより伝達側は伝達事項を掲載した時刻と比較することで、被伝達側が伝達事項を参照したかどうかを確認することができる。ここでは、図 4-46の下部にある 'RE-WRITE' ボタンを押すことで表示情報を更新することができる。

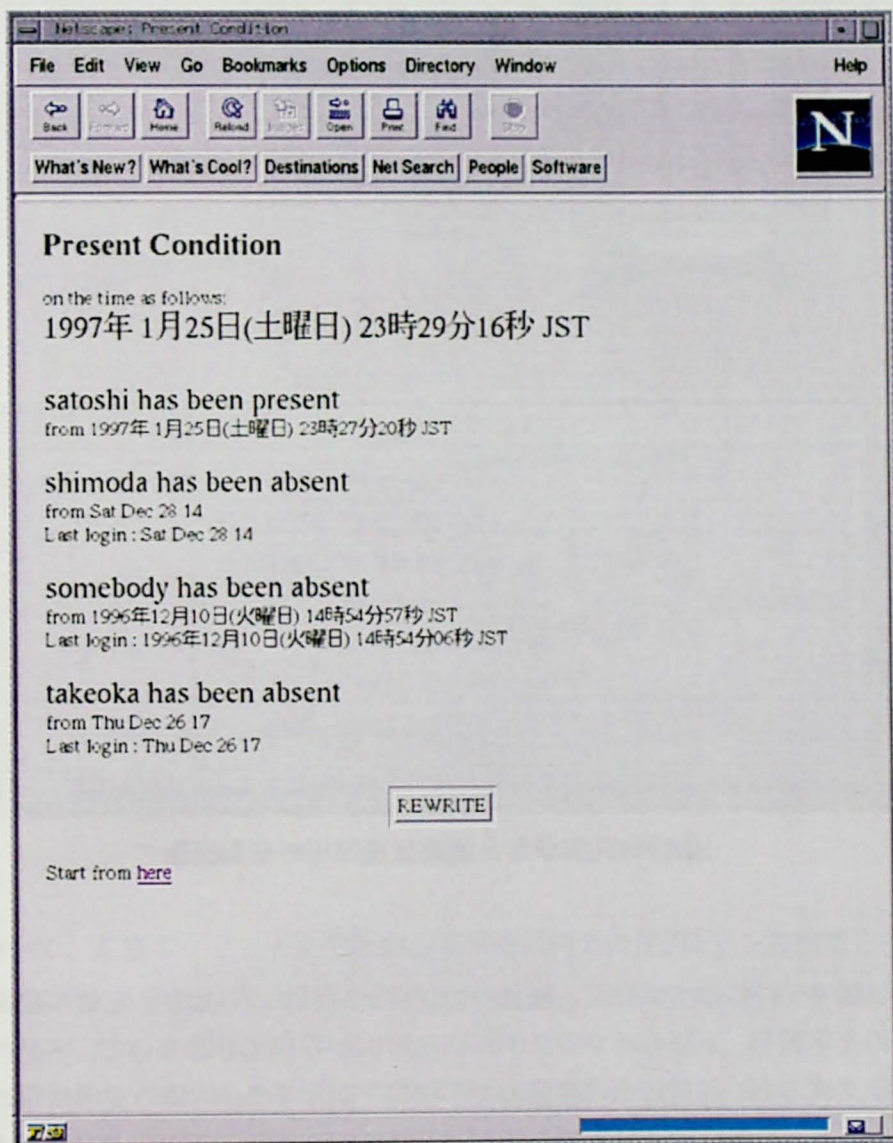


図 4-46 在席管理の画面

4.3.5.2 構成部品関連支援

本支援環境は、4.3.2項で述べた設計対象構造物の構成部品に関連する情報の理解を支援するための環境である。図 4-47にその初期画面を示す。

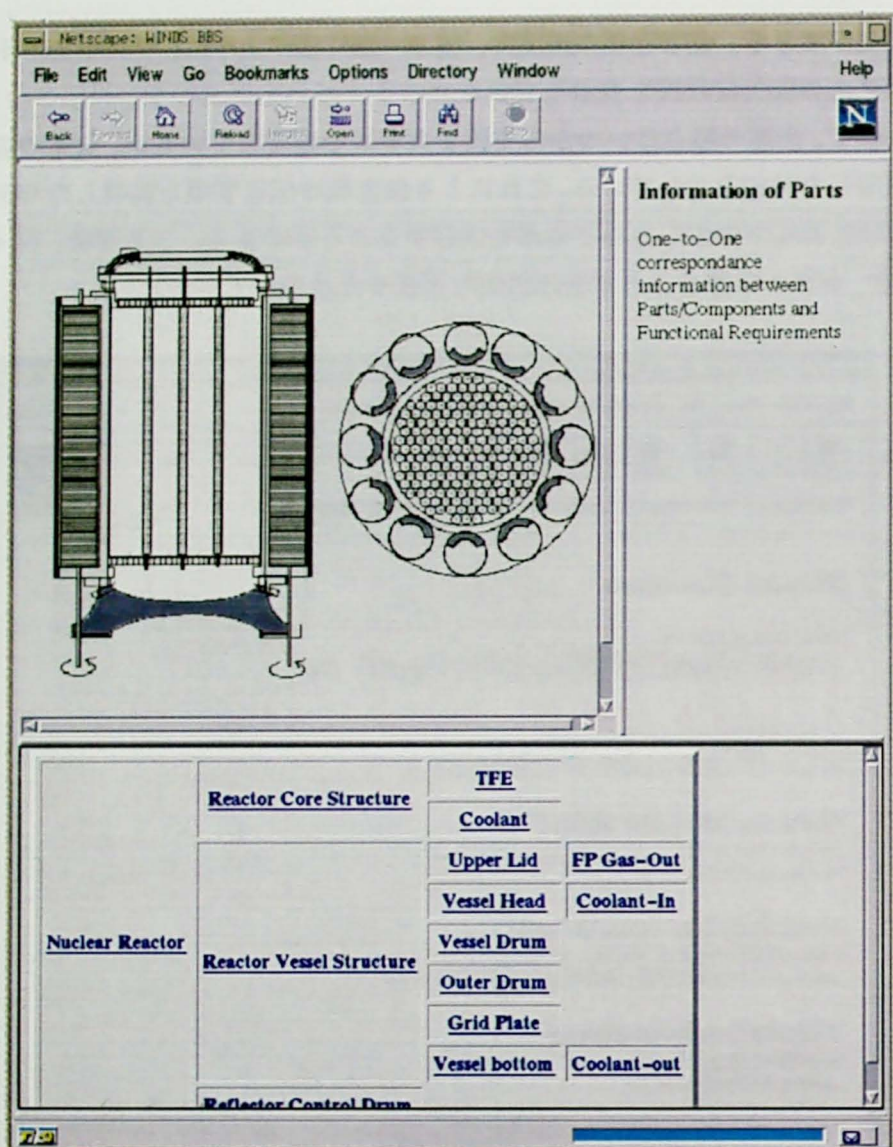


図 4-47 構成部品関連支援環境の初期画面

本支援環境は、図 4-47に示すように、複数のサブウィンドウからなり、左側の設計対象の概念図、右側の部品機能の文字情報、下部のサブシステムの階層図から構成されている。下部の階層図でサブシステム名をクリックすると、右側にその機能の文字情報を表示する。右側の文字情報のうちサブシステム名をクリックすると、左側に設計対象物の側面図と断面図の 2 次元平面図が表示され、赤い部分がそのサブシステムの位置を示す。図 4-48の例は TFE に関する情報提供の画面を表示したものである。

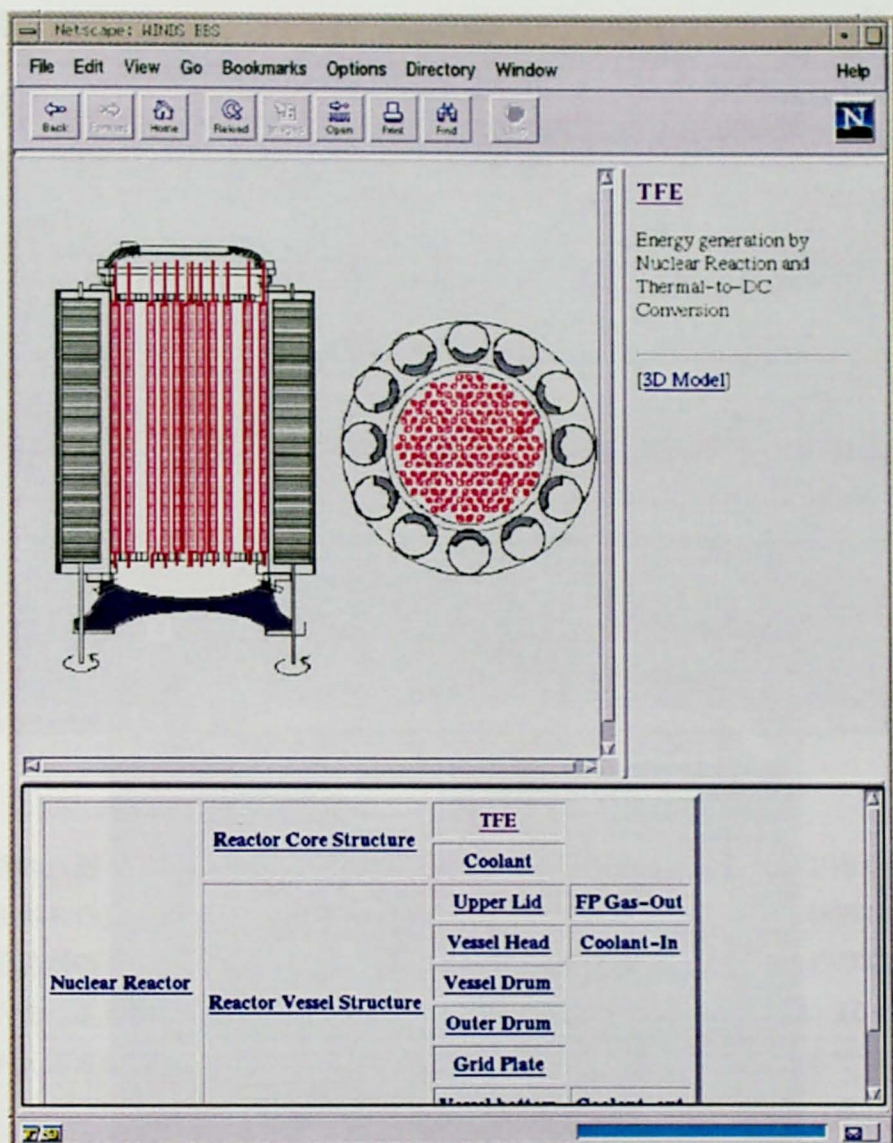


図 4-48 TFE に関する情報提供の画面

図 4-48において、左側のウィンドウでは炉心部平面図内での TFE ピンの位置を示し、右側のウィンドウでは TFE に関する機能の文字情報が表示されている。下部のウィンドウでは階層図内で宇宙用原子炉全体システムに対する TFE サブシステムの位置が示されている。

右側のウィンドウ中の '3D Model' をクリックすれば、図 4-49に示すように、新たなウィンドウに対象構造部品の VRML 形式 3 次元モデルが立体的に表現される。



図 4-49 VRML 形式での3次元モデルの表示画面

このウィンドウ内では、設計者の操作に応じてモデルの拡大・縮小・回転、視点の移動などが可能であり、実体構造の理解を支援する。図 4-49では宇宙用原子炉炉心の全体構造の3次元モデルを表示している。図 4-49での3次元モデルの外部部品をマウスでクリックすれば、その外部部品が取り除かれ、図 4-50・図 4-51・図 4-52の様にさらに内部の構造を確認することができる。また、各サブシステムごとの3次元モデルを表示することも可能である。例えばベッセルドラムの3次元モデルは図 4-53のように表示される。



図 4-50 外部部品が取り除かれる様子(1)



図 4-51 外部部品が取り除かれる様子(2)



図 4-52 外部部品が取り除かれる様子(3)

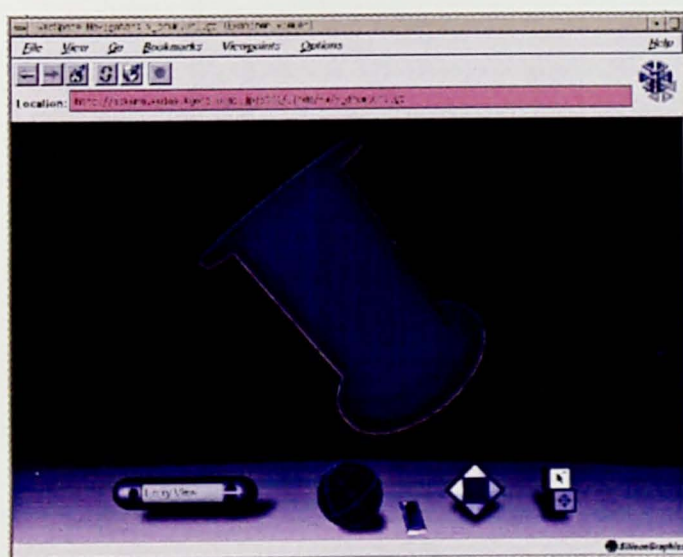


図 4-53 ベッセルドラムの3次元モデルの表示画面

4.3.5.3 解析計算支援

本支援環境は、工学解析計算について計算実行を支援するための環境であり、4.3.3.1で述べた解析計算支援環境の整備だけでなく、4.3.3.2で述べた蓄積事例の検索機構も含めて実現している。

解析計算実行

(1) 設計入力

計算を実行するにあたり、設計者はまず初めに設計パラメータを入力することになる。設計パラメータ入力環境は、3種類の工学解析計算のそれぞれについて、右側の設計入力をするGUI、左側の対象概念図とその下部のタイマー時計から構成される。その一例としてSRACの入力画面を図4-54に示す。図4-54の右側の部分が実際に設計者が設計入力をするインタフェースを提供する。設計者はマウスを用いて、数字の両側にあるボタン操作で数値の大小を変更できる。対象概念図を設計入力のGUIと併せて提示することにより設計者は、数値だけで表される設計パラメータを実際の構造物に対応させて考えることができる。

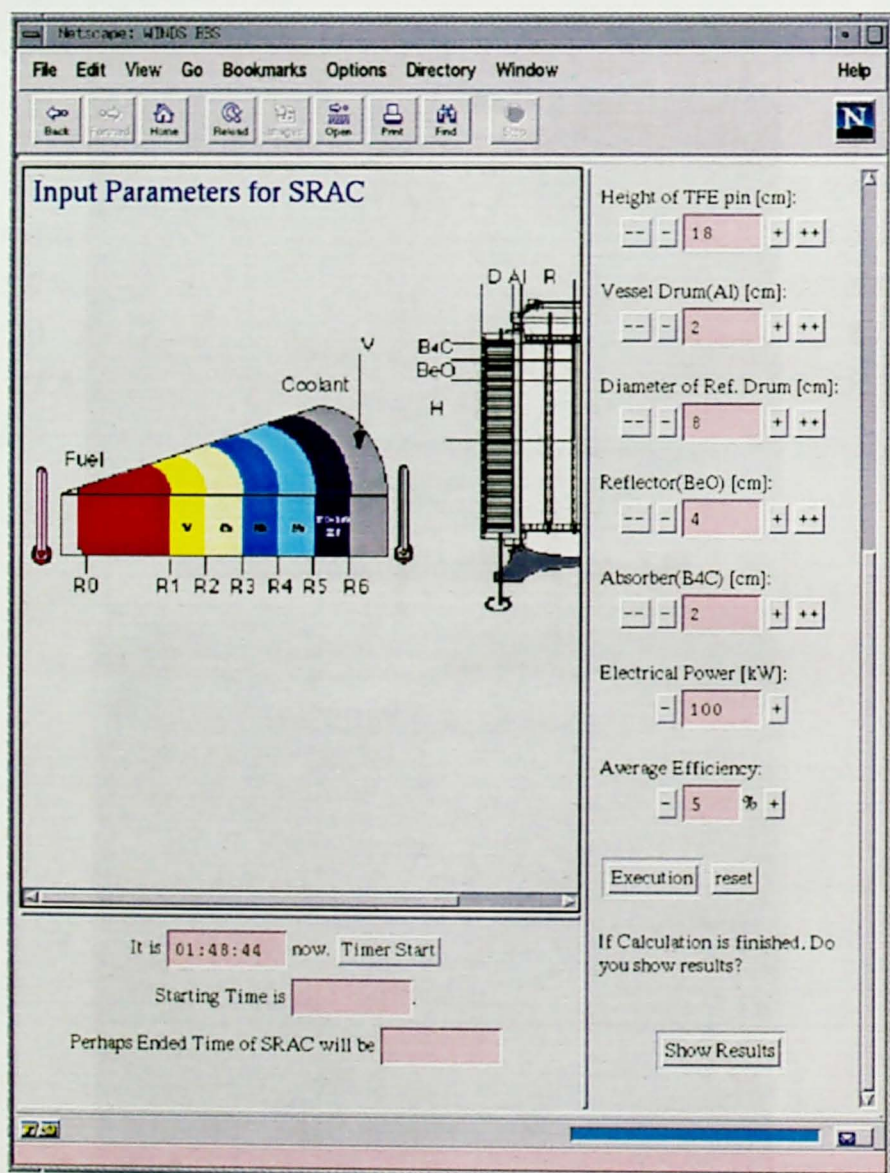


図 4-54 SRAC 解析の実行画面

(2) 計算実行

設計者が意図する設計値を入力し終えたら、図 4-54の右下の‘Execution’ ボタンを押すことで、前述の解析計算制御モジュールが動作し、サーバ側の解析用計算機において解析計算が実行される。解析計算に要する時間はその種類により異なる。図 4-54の下部の常時動いている時計は、本支援システム利用時の時刻を示しているだけではなく、計算実行時間を計測するタイマー時計の機能を含んでいる。計算に要する時間はサーバの解析用計算機の計算負荷状態によるため特定はできないが、設計者は計算実行時に図 4-54下部の‘Timer Start’ のボタンを押してタイマーを作動させ、おおよそのくらいで計算が完了するかが判るようになっている。一旦計算を実行すれば、たとえページを移ったとしても、サーバ側の解析用計算機上では計算が実行されている。

(3) 結果表示

設計者は、タイマーを調べて計算が終了する時分になったら、図 4-54の右下の‘Show Results’ のボタンを押すと、計算結果を表示する画面に移ることができる。計算結果については、TFE 計算と SRAC 及びそれらを複合した収束計算の 3 種類のそれぞれの解析計算に対応する結果を表示する。表 4-14にそれぞれの計算に対応する結果を示す。

表 4-14 工学解析計算の結果一覧

計算の種類	計算結果
TFE 計算	燃料中心温度・冷却材出口温度・平均発電効率
SRAC	4 通り* の実効増倍率 $k_{effective}$ ・熱出力密度分布
複合収束計算	4 通り* の燃料／冷却材温度・平均発電効率・実効増倍率・熱出力分布

* 4 通りとは、運転初期・12 年後それぞれの状態について回転制御ドラムの吸収体の方向が内側と外側の場合のことを表す。

a. TFE 計算

まず、TFE 計算の結果表示画面から説明する。結果表示画面は図 4-55のように、上部の概念図と入力パラメータの一覧表、下部のグラフ群から構成される。計算結果が制約条件に違反しているかどうかの警告表示は、図 4-55上部の入力パラメータの表で行われる。燃料／冷却材が点滅している時はそれぞれ燃料中心温度／冷却材出口温度が熱的制約条件を満たしていないことを示している。下部のグラフ群の一部は温度計メタファを用いたものであり、設計者は一見してそれが温度を示していることを理解できる。左側の赤色の温度計グラフは、燃料中心温度を表している。この温度計グラフについて、燃料融点を温度計上部の黒線の目盛で示し、計算された燃料中心温度をグラフと数値で示しており、それらの差が燃料に関する設計余裕となる。もし、燃料中心温度が燃料融点を越えていれば、制約条件に違反していることになる。中央の青色の温度計グラフは冷却材出口温度を表しており、冷却材沸点を黒線の目盛で、冷却材出口温度をグラフで示している。右側のグラフは TFE ピン 1 本あたりの平均発電効率を表している。

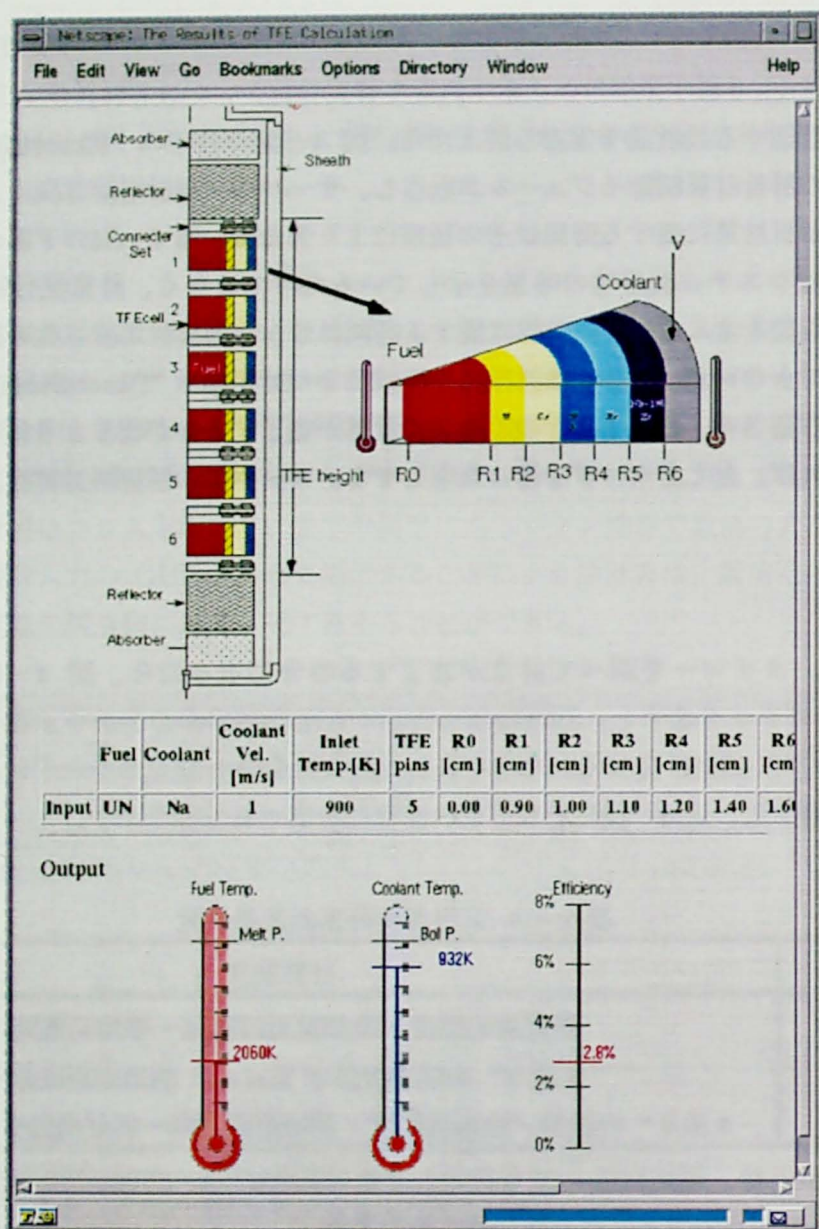


図 4-55 TFE 計算の結果表示画面

b. SRAC

次に、SRAC の結果表示画面を説明する。図 4-56 は、TFE 計算の結果表示と同様、上部の概念図と入力一覧表、下部の図とグラフで示される計算結果からなる。制約条件違反の警告表示は、TFE 計算と同様に図 4-56 上部の入力一覧表の中で行われる。最左端の 'Input' の文字が青色の時は、初期状態・12 年後の状態のそれぞれについて回転制御ドラムの吸収体が内側・外側の計 4 通りについて原子炉が臨界に達しており且つ制御可能である、すなわち、核的制約条件を満足していることを示す。赤色の時はいずれかのパターンがその制約条件違反を犯していることを示す。下部の計算結果については、左側が 'Out'、すなわち、回転制御ドラムの吸収体が外側の時の実効増倍率のグラフを示し、また、右側が 'In'、すなわち、吸収体が内側の時のグラフを示している。'Fresh' とは原子炉炉心燃料の燃焼に関しての初期状態、'12years' とは 12 年後の状態を表す。左下の '12years later' のボタンを押すと、ウィンドウ下部が図 4-57 に示すように状態が替わり、それに応じてグラフも変化する。

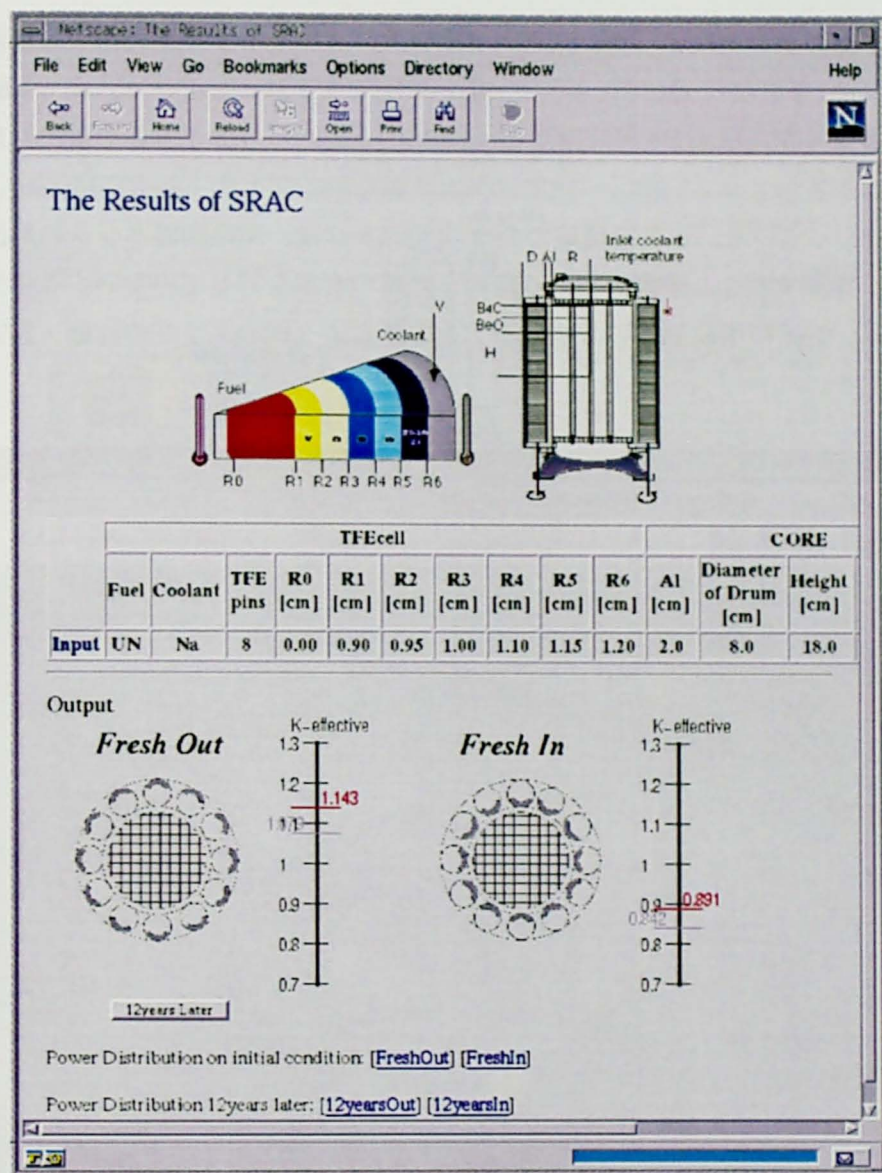


図 4-56 SRAC の結果表示画面

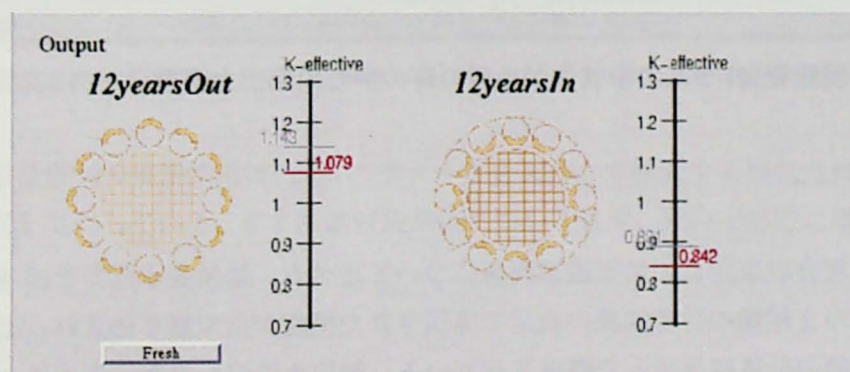


図 4-57 SRAC の結果表示における変化

グラフから、実効増倍率が 1.0 を越えるかどうかで原子炉が臨界に達するかどうかを調べることができるため、初期状態から年月を経た状態であっても、原子炉の制御が可能かどうかを視覚的に確認することができる。加えてグラフからは核計算における設計余裕も知ることができる。

また、最下部のリンクによって、熱出力密度分布の3次元グラフを表示する画面へ移行できる。

‘FreshOut’ をクリックすると新たに WWW ブラウザが立ち上がり、図 4-58 のように前述の解析計算制御モジュールが作成した、回転制御ドラムの吸収体が外側の時の熱出力密度分布の3次元グラフが表示される。図 4-58 では、水平軸を炉心径方向・軸方向[mesh]、垂直軸を熱出力密度[W/cc]としている。本支援環境での3次元グラフは、回転制御ドラムの熱出力に対する影響を視覚的に理解することが目的であるため、数値の表示を行っていない。ここでは VRML の機能を用いて、前述の構成部品の3次元モデルと同じように、グラフの回転・拡大、視点の移動を容易に行える。

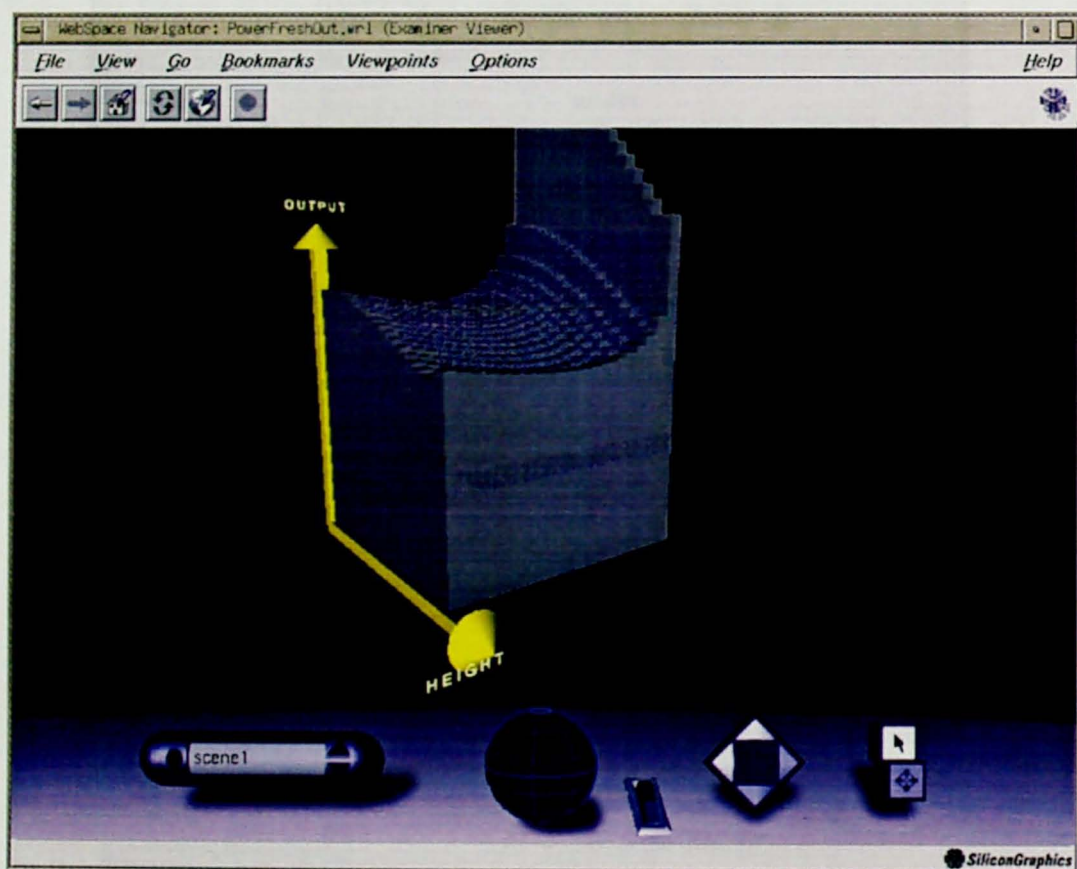


図 4-58 回転制御ドラムの吸収体が外側の時の炉心内熱出力密度分布の3次元グラフ画面

c. 複合収束計算

最後に、複合収束計算の結果表示画面について述べる。結果表示画面を図 4-59 に示す。ここでは、上記の2種類の計算結果の表示で実現された機能が全て盛り込まれ、上部の概念図と入力一覧表、下部の計算結果図とで構成されている。制約条件違反の警告表示は上部入力一覧表中に表示される。図 4-59 の下部の計算結果は、更に上下2段に分かれており、上部が回転制御ドラムの吸収体が外側の時のグラフ群であり、下部はそれが内側の時を表している。上部・下部それぞれの左下のボタンは SRAC の時と共通の役割を果たしており、状態の変化によって各々のグラフ群が変化する。それぞれの下方にあるリンクをたどれば各状態の熱出力密度分布の3次元グラフを表示する。

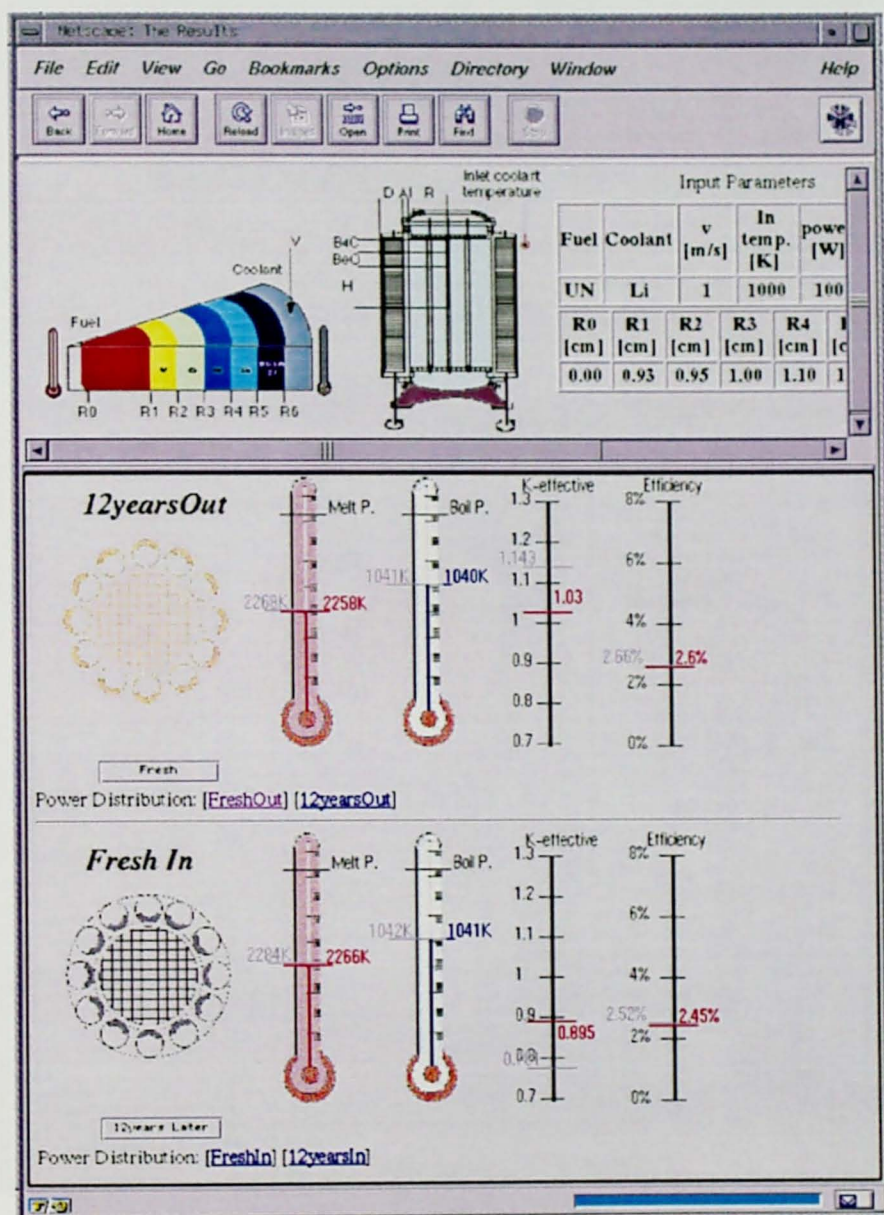


図 4-59 複合収束計算の結果表示画面

設計事例の検索

ここでの設計蓄積事例の検索機構は、設計パラメータを入力して検索する類似性検索と限定された注釈項目による検索を実現している。まず検索対象事例について述べ、続いて実際に構築した検索機構を説明する。

事例

事例は、TFE 計算と SRAC との複合収束計算における入力パラメータと計算結果の組からなる数値情報と、設計への注釈や事例を作成した設計者の名前とその専門分野、作成日時、文字情報で構成されたファイルである。蓄積事例は、図 4-60 に示すように WWW ブラウザから直接参照できる。

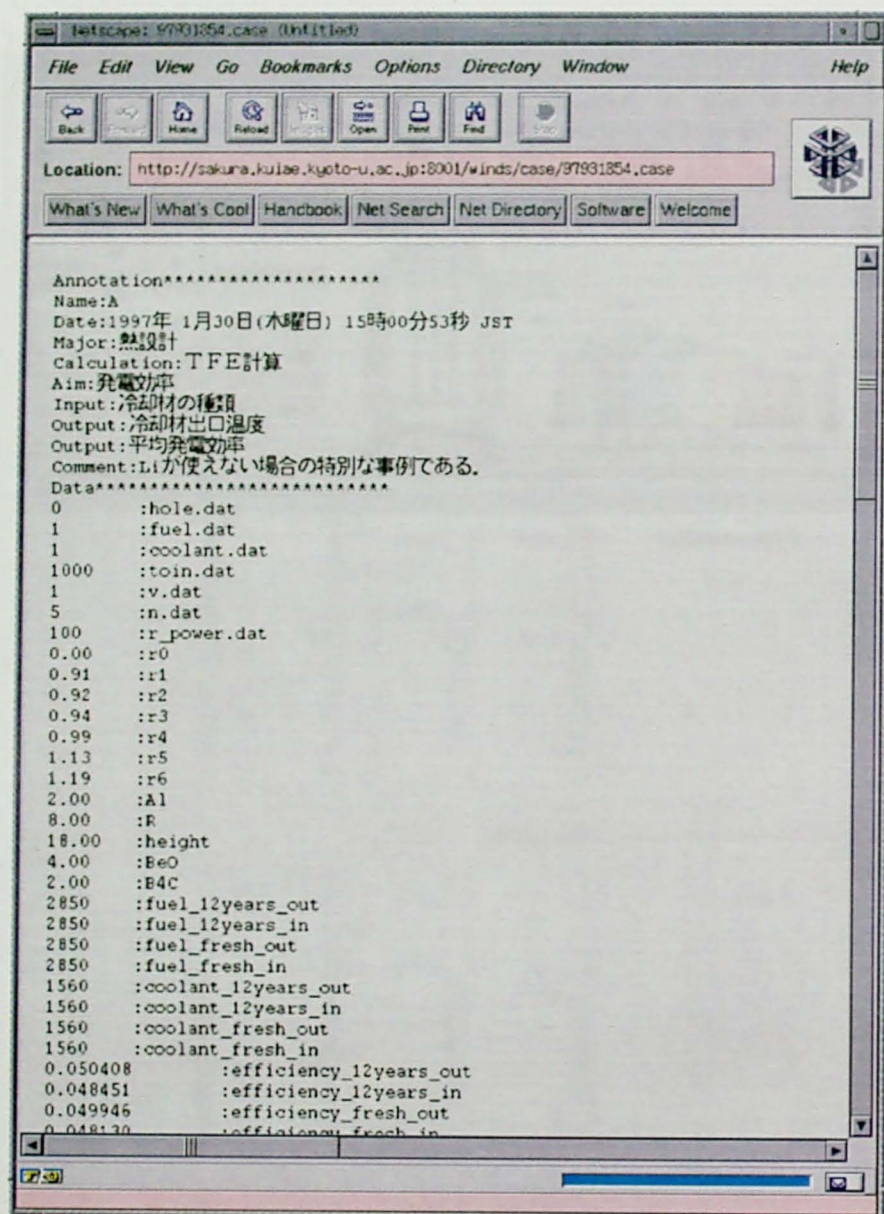


図 4-60 事例表示の画面

類似性検索機構

蓄積事例の類似性検索を実行するためには、設計者はまず初めに検索条件を入力することになる。検索条件は複合収束計算への設計入力パラメータと同一であるため、検索条件入力環境は、解析計算における設計パラメータ入力環境と同様、図 4-61 のように左側の対象概念図と右側の検索パラメータ入力をする GUI から構成される。検索条件の入力方法も解析計算の時と同様である。設計者は、検索する設計値を入力し終えたら、図 4-61 の右下の 'submit' ボタンを押した後、何種類の事例を表示させるかを選択し、'Search' ボタンを押すことによって検索が実行される。検索機構は WWW サーバ計算機上で前述の類似性検索モジュールによって実現されているため、ほぼ瞬時に結果を得ることができる。

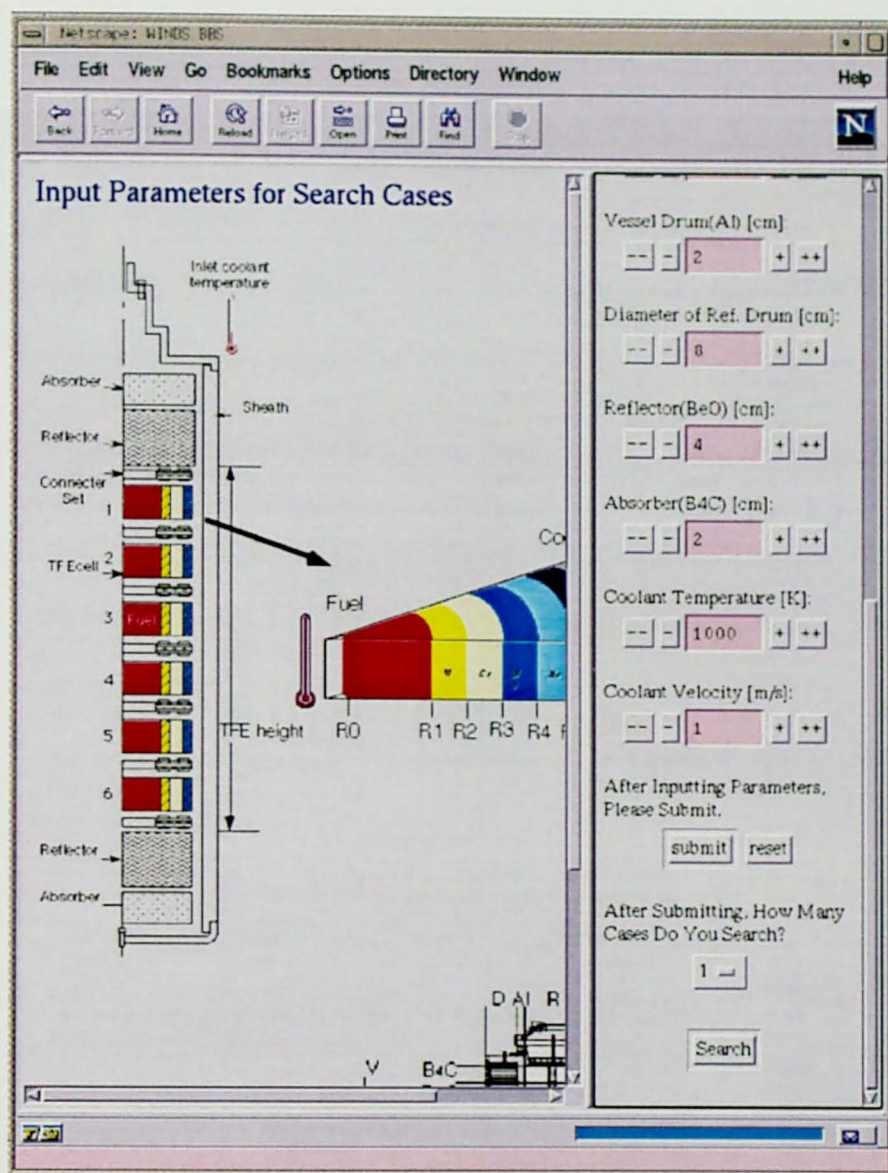


図 4-61 類似性検索の入力画面

検索結果は比較的多くのデータがあるため、まず得られた結果全てを整理した一覧表の表示が行われる。検索結果の表示画面は、図 4-62 のように、上から検索された事例のファイル群、入力一覧表、出力一覧表で構成されている。図 4-62 の最上部にある検索事例のファイル群は、検索実行の際に指定した種類数だけ設計事例のファイル名が表示され、それぞれの設計事例ファイルへリンクされている。設計事例ファイルを指定することで、原始的な入出力データと後述する設計への注釈を参照できる。その下に位置する入力一覧表は、検索条件と設計事例における入力パラメータの一覧表であり、検索条件に対して、番号順に類似度が高い事例を表示している。計算結果が制約条件を違反しているかどうかの警告の表示については、計算結果の表示と同様に入力一覧表で行われる。燃料や冷却材が点滅している時は熱的制約条件を、また、同表の左端の番号が赤色の時は核的制約条件を満たしていないことを示している。図 4-62 の下部にある出力一覧表は、検索された事例の計算出力結果を入力表の番号と対応するように表示している。出力表は、各事例ごとに、燃料中心温度・冷却材出口温度・実効増倍率・平均発電効率の結果を、初期・12 年後それぞれの吸収体方向の計 4 通りについて整理している。設計者は、結果画面を見ながら

複数の検索された事例間で比較検討できる。

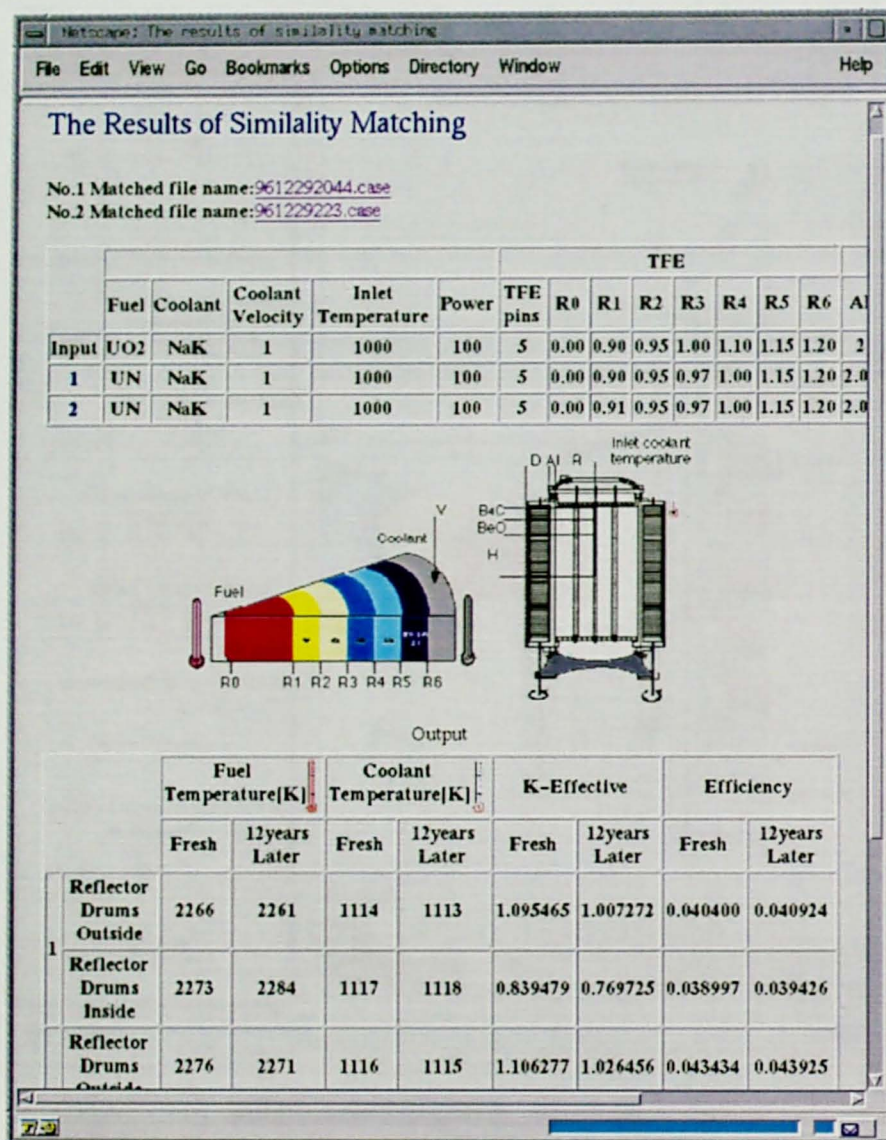


図 4-62 類似性検索の結果表示画面

更に、熱出力密度分布を検討したり結果のグラフを見たいような場合は、各事例ごとの詳細結果の表示を行うことができる。結果表示画面の下部にある選択肢で詳細結果の表示を行いたい番号を選択し、‘show’ ボタンを押せば、複合収束計算の結果表示と同一の図 4-59 に示す画面が表示される。詳細結果の表示画面における機能は、複合収束計算の結果で実現されていたものと同一であり、結果のグラフ化や状態の変更、3次元グラフの検討などを行うことができる。

設計への注釈とその検索

設計への注釈を行うのは解析計算を実行する前後が多いと思われる。しかし、解析計算実行への支援環境の中に注釈機構を設けると、前述の類似性検索で検索した事例に注釈を付け加えようとした場合に困難が生じるので、注釈機構を利用するためには、新たに WWW ブラウザを開いて注釈付けを行う独立した環境を設ける。設計への注釈付けを行う画面を図 4-63 に示す。

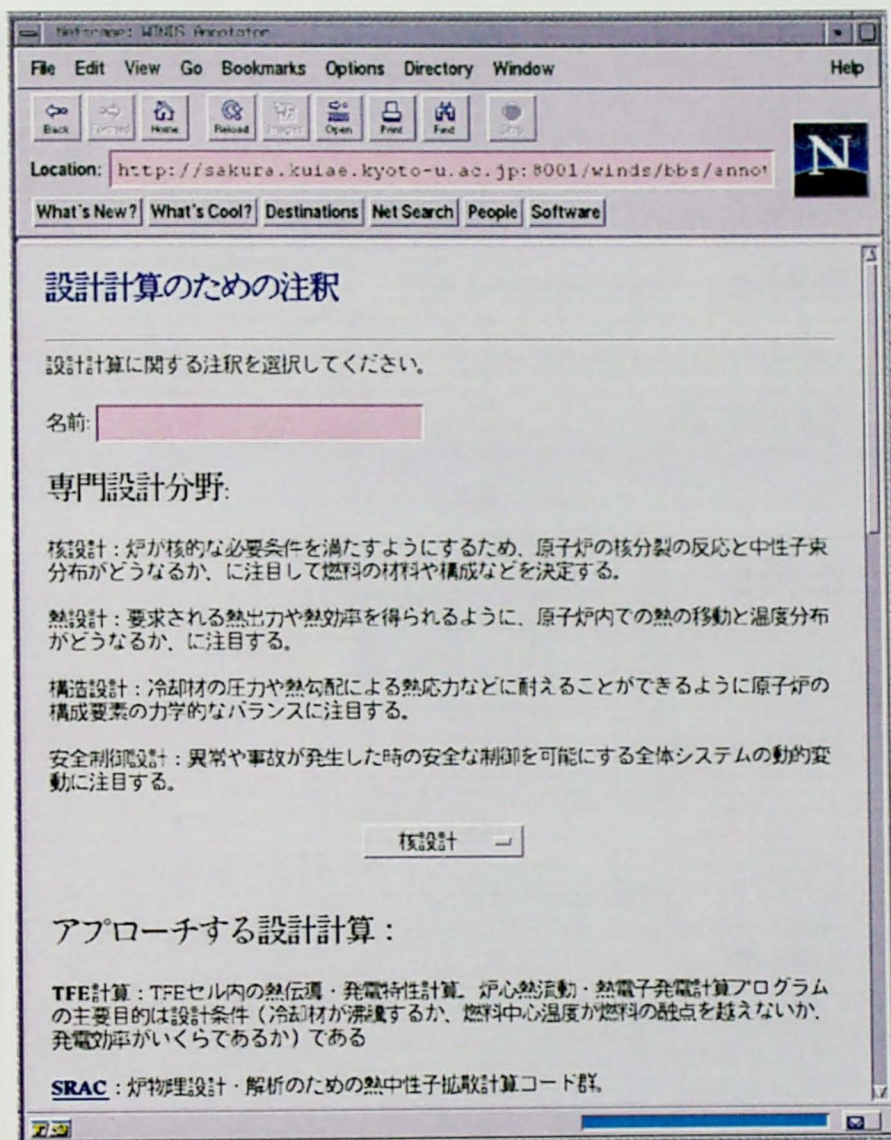


図 4-63 設計への注釈付けの画面

注釈付けを行う設計者は、図 4-63において、設計者の名前、注釈の選択事項の選択、自由文の入力部分、注釈付けを行う事例ファイル名のそれぞれを入力する。注釈の選択事項としては 4.3.3.3に述べたように、専門設計分野・設計計算・計算全体の着目点・入力／出力についての着目点を設定しており、選択事項の中から単数または複数項目を選択する。また、設定項目以外の項目や一般的なコメントを自由文で入力することができる。

次に設計への注釈による検索について述べる。検索入力画面は図 4-64に示すように注釈付けの画面と同様である。ただし、注釈付けにおいて自由文として入力した部分は検索対象とならない。検索実行後の検索結果の表示は、図 4-65に示すように、前述した類似性検索結果の表示と同様である。検索された複数の設計事例の計算入出力結果は、一覧表で表示され比較検討することができる。各事例ごとの設計への注釈は、その事例ファイルを直接参照することで確認できる。

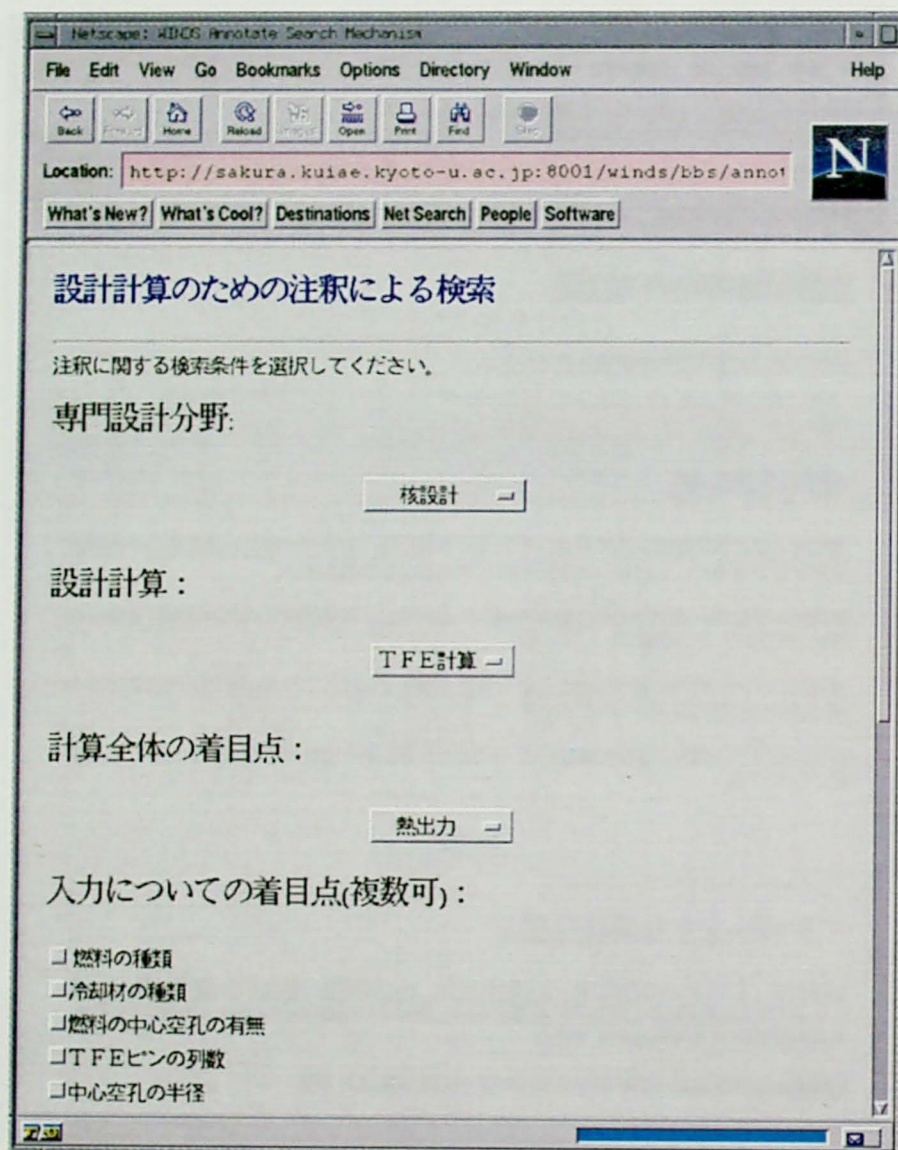


図 4-64 設計への注釈による検索入力画面

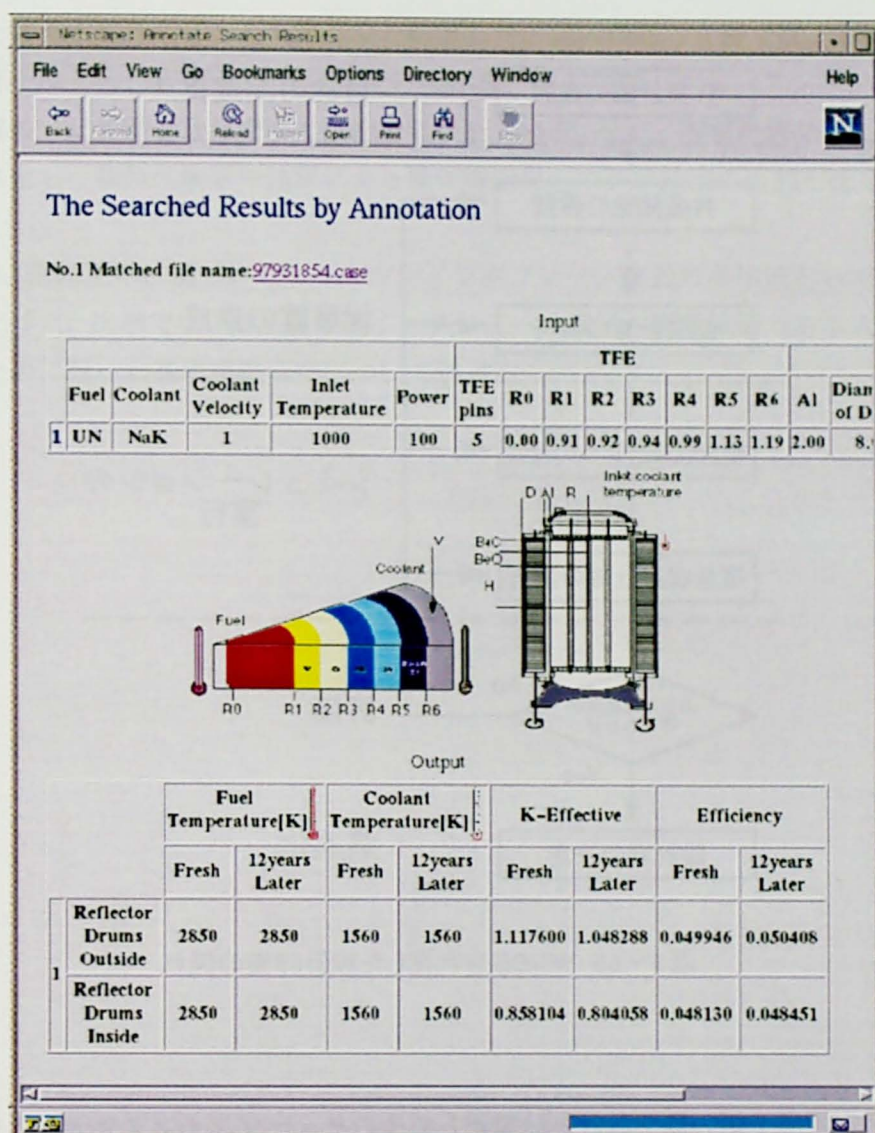


図 4-65 注釈による検索結果表示の画面

4.3.5.4 作業例

本項では、構築した統合型設計支援システムを用いて実際にどのような設計作業の流れで作業が進行するかについて検討する。本研究での宇宙用原子炉の概念設計を対象とした設計作業の流れの概略を図 4-66 に示す。図 4-66 に示す通り、以下のような作業段階を経る。

1. 作業計画の検討
2. 共通知識の確認
3. TFE 計算・SRAC の個別の計算の実行
4. 複合収束計算への検索
5. 複合収束計算の実行
6. 設計案の決定

各作業段階において、設計者間の意見交換が支援システム内で行われる。また、2.~5.の段階は設計者の要求に応じて繰り返し実行される。専門家の意見を参考にして想定した作業例の詳細については付録 C で述べる。

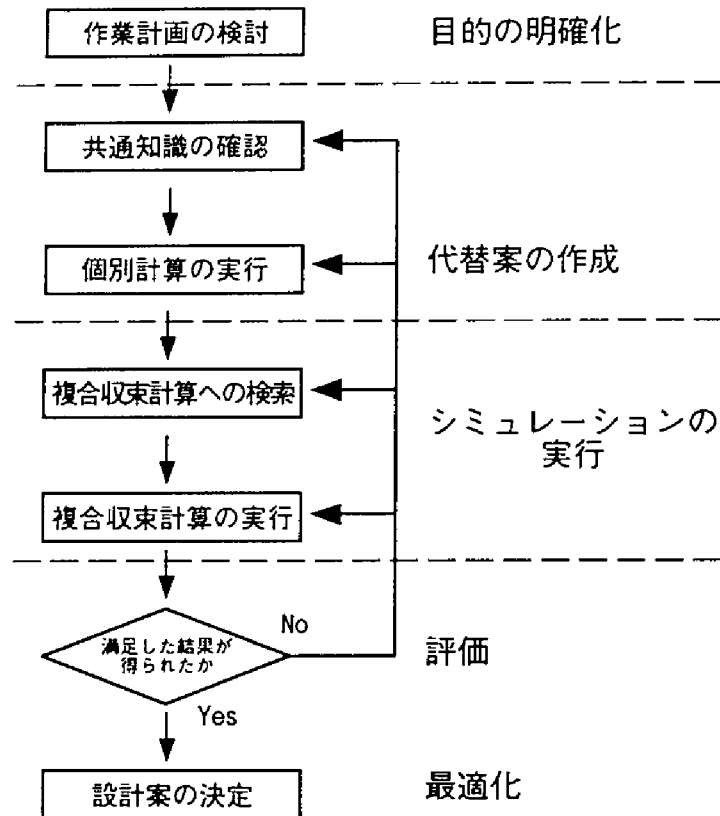


図 4-66 WINDS を利用した設計作業の流れ

4.4 まとめ

本研究では、宇宙用原子炉の概念設計と対象としてそのヒューマンインタフェースを含む統合的な設計支援環境を構築した。

仮想現実感を応用した概念設計支援環境 VINDS は、未だ存在しない宇宙用原子炉に関してその構造や機能構成の理解の促進と工学解析計算の支援を目的として構築した。その際には、仮想空間の特徴を最大限に生かして実体構造や機能を系統立てて階層的に表現し、設計者のメンタルモデル形成を支援する。解析計算の際にも、パラメータの設定・シミュレーションの実行・結果の表示をすべて仮想空間内で行えるようにしている。また、設計知識はエキスパートシステムを用いて一元管理している。同様に、計算結果の評価の際には制約条件に違反していないかどうかエキスパートシステムにより調べている。VINDS では、これらの機能を提供するために3つの World (Structural World, Functional World, Analysis World)を実現している。Structural World では、主に設計対象である宇宙用原子炉の実体構造を仮想現実感を用いて提示する。ここでは、ただ単に立体的に構造を見るだけでなく、それを手にとってあらゆる方向から観察できるようなインタフェースを実現している。Functional World では、機能を階層化し、実体構造とそれに対応する機能を提示する。また、Analysis World では、解析計算の際に必要な入力パラメータの設定を仮想空間内で直観的に行い、計算の実行および結果の表示についてもすべて仮想空間内で実行することができる。

一方、WWW を応用した非同期分散型設計支援環境 WINDS は、仮想現実感技術の特徴である直接操作は実現できていないものの、VINDS と同等の機能を継承し、さらに分散している複数の設計者が

協同で設計作業を進めることができる支援環境を構築した。協同作業の支援では、WWW サーバによる設計情報の共有をはじめ、WWW ブラウザ上に掲示板、在席管理、ニュースシステムによる作業状況管理などの情報の一元管理と意見交換の機能を実現している。また、解析計算結果については、それらをデータベース化し、類似性検索や注釈による検索機能などで計算結果の再利用化を図っている。

以上、本章では、認知工学に基づいたヒューマンインタフェース設計の具体例として宇宙用原子炉の概念設計を取り上げた。次章では、相互適応型インタフェース構築の要素技術である人間情報行動計測技術を確立するために行った基礎実験研究について述べる。

4 章 参考文献

- [1] H.J.Snyder and J.H.Masson, M.S.El-Genk and M.D.Hoover(Editor): "in Space Nuclear Power System 1985", Orbit Book Company, 1985, pp.223-229.
- [2] K.Tsuchihashi, et al: "SRAC - JAERI Thermal Reactor Standard Codes System for Reactor Design and Analysis", JAERI, 1983.
- [3] T.Kubo, et al: "An EWS Version of the SRAC Code", JAERI, 1994.
- [4] StereoGraphics Corporation: "CrystalEyes Stereoscopic System User's Manual", StereoGraphics Corporation, 1992.
- [5] SENSE8TM Corporation: "WorldToolKitTM SGI Version 2.1 Hardware Guide", SENSE8TM Corporation, 1995.
- [6] SENSE8TM Corporation: "WorldToolKitTM SGI Version 2.1 Reference Manual", SENSE8TM Corporation, 1995.
- [7] Autodesk: "AutoCAD RELEASE 11 Reference Manual", Autodesk, 1990.
- [8] N.P.Sue: 「設計の原理 -創造的機械設計論-」, 朝倉書店, 1992.
- [9] 伊藤忠テクノサイエンス株式会社: "G2 Reference Manual Version 3.0", 伊藤忠テクノサイエンス株式会社, 1990.
- [10] 松下温、他編: 「知的触発に向かう情報社会 -グループウェア維新」, 共立出版, 1995.
- [11] 上滝致孝: 「ヒューマンインタフェースの問題」, パーソナル情報環境協会, 1995.
- [12] 伊藤美光: 「新しい機械設計法」, 日刊工業新聞社, 1991.
- [13] 小林重信: 「事例ベース推論の現状と展望」, 人工知能学会誌, Vol.75, No.2, 1992, pp.20-38.
- [14] 中小路久美代ほか: 「設計プロセスとアーティファクトの統合による非同期協同設計支援環境」, 計測自動制御学会誌, Vol.34, No.12, 1995, pp.948-953.

5章 ヒューマンインタフェースにおける人間のオンライン認知情報処理特性に関する基礎実験研究

前章までは、人間と機械の円滑なコミュニケーションを目指し、具体的なシステムを対象として人間の認知情報処理活動に着目したヒューマンインタフェース設計法の検討を行い、コンピュータ要素技術を生かして実際にヒューマンインタフェースを構築した。本章では、さらに高度なヒューマンインタフェースである相互適応型インタフェース技術の確立を目指して人間情報行動計測技術の実用化のための基礎実験研究を行う。

5.1 実験の目的と着眼点

5.1.1 実験の目的

相互適応型インタフェースは、2章の図2-4に示したように情報行動計測、認知状態推定、最適情報提示計画、情報提示の4つの段階で実現され、そのためには、図2-5で示したように人間情報行動計測技術、ヒューマンモデル技術、情報提示技術が必要である。相互適応型インタフェースでは、操作者に「適応」して最適なタスク分配や情報提示を行うために、操作者の思考活動を含む内面状態をリアルタイムで正しく把握することが前提となる。しかし、現在のところ、人間の思考活動を対象とする人間情報行動計測技術および認知状態推定技術は確立されておらず、相互適応型インタフェース実現のためのボトルネックとなっている。そこで、本研究では、これらの技術を確立するための基礎的な技術開発や知見を得るために被験者による基礎認知心理実験を行う。具体的には、被験者に適当な認知課題を与えて、様々な生理指標を計測・解析する基礎実験を行い、(1)人間情報行動の計測上、有効な指標を検討し、(2)リアルタイム計測技術を開発するとともに、基礎実験のデータを多角的に分析して、(3)人間の認知情報処理過程をどの程度まで推定できるかを検討する。人間と機械のインタラクションにおいて人間から得られる情報には、操作記録、発話記録の他に生理電気信号や視覚系指標などがあるが、本研究では特に、眼球運動、瞳孔反応、瞬目（まばたき）等の視覚系指標に着目して情報収集手法の開発と分析を行う。

以下、本節では、人間から得られる様々な生理指標について心理生理学による知見と、それらを計測・解析するための基礎実験の着眼点について述べる。

5.1.2 心理生理学

心理生理学とは、基本的な情動反応からより高次の認知過程を含む人間の行動と各種の生理的反応との関連を明らかにする学問である^[1]。この心理生理学が対象とする生理的測度には、脳波、事象関連脳電位、筋電位、瞳孔、眼球運動、瞬目、心臓活動、血流量、血圧、呼吸、酸素消費、唾液分泌、皮膚温度などの様々な指標がある。これらの生理的測度はすべて神経系の支配下にある。神経系は高度に統合されているが、便宜上は種々の測度をこの系のいずれかの下位区分によって制御されているとみなすことができる。図5-1に神経系の簡単な区分構成を示す。

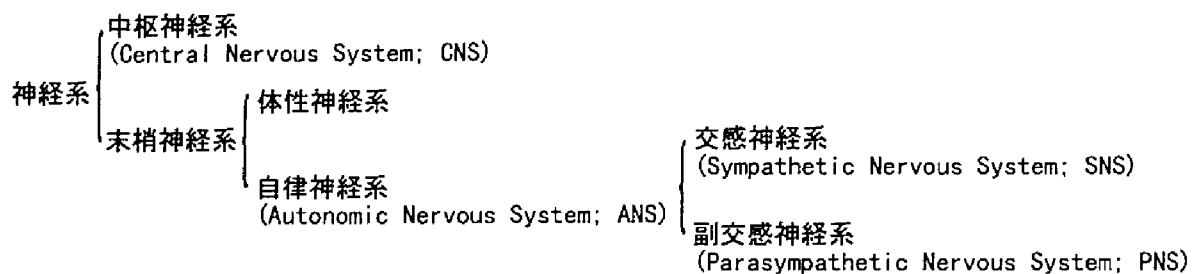


図 5-1 神経系の主な区分

図 5-1 に示すように、神経系は中枢神経系(Central Nervous System; CNS)と末梢神経系という 2 つの主要な支系に分けられる。CNS には脳と脊髄が含まれる。末梢神経系は、脳神経と脊髄神経を含む脳と脊髄以外の神経組織を指す。末梢神経はさらに、筋活動に関与する骨格系と内臓構造を制御する自律神経系(Autonomic Nervous System; ANS)とに分けられる。最終的に、自律神経系はエネルギーの動員を要する場面で優位となる交感神経系(Sympathetic Nervous System)と、休息時にその神経支配機構が優位になる副交感神経系(Parasympathetic Nervous System)に分けられる。生理的測定は、たとえば、心拍や血圧が交感神経系と副交感神経系の両方のバランスで制御されているように、これらの神経系に直接割り当てられるわけではない。特に、心理生理学での興味ある生理的反応は自律神経系によって制御されており、交感神経系と副交感神経系を含む自律神経系は心理生理学にとってきわめて重要な系である。

本研究では、主に自律神経系に支配される各種の生理指標を計測するが、特に、認知情報処理過程を推定するために、人間の五感のなかで最も取り込む情報量が多いといわれている視覚に着目し、視覚系データを収集・解析することにより認知行動の特性との関連を調べる。以下では、この視覚系データのうち、瞳孔反応、眼球運動、瞬目に関する知見について簡単に説明する。

瞳孔反応

人間の瞳孔の大きさは、直径 1.5mm まで収縮し、8~9mm かそれ以上まで散大できる。そして、0.2 秒で光の刺激に反応できる。瞳孔の収縮と散大は、自律神経系の支配を受ける。すなわち、交感神経は虹彩の環状線維を刺激して瞳孔を収縮させ、副交感神経は逆に虹彩の放射状線維を刺激して瞳孔を散大させる。この両者がバランスする事によって瞳孔の収縮と散大が生じる。瞳孔の収縮と散大は網膜への光の量を調節する働きが主であるが、感情や精神活動からも影響を受けるといわれている。以下では、本研究に関係のある瞳孔径変化の要因を述べる。

- (1) 疲労……Lowenstein と Lowenfeld は、瞳孔径が休息十分な被験者で最大で、疲労とともに減少し、睡眠直前に最小になると指摘している[2]。また、Kahneman と Peavler は、実験セッションの始めから終わりの間に瞳孔の大きさが連続的に減少するとの所見を得た[3]。
- (2) 感情……Hess と Polt の研究によると、見ているものに好意的な感情（正の感情）を持つと瞳孔は散大し、不快な感情（負の感情）の場合は瞳孔は収縮する[4]。但し、負の感情の方については多くの研究者から疑問が投げかけられている[1]。
- (3) 精神活動……Hess と Polt は掛算の暗算の際に瞳孔径が大きくなることを認めた[5]。別の実験では、誤答に対して弱い電撃を与えると、問題を解こうとする努力が大きくなるが、これが今度はより大きな瞳孔収縮をもたらした。また Paivio と Simpson その他の研究によると、具象的な語と抽象的

な語から心像（メンタルモデルに相当する）を形成するとき、抽象的な語の場合の方が瞳孔散大が大きい[6]。

- (4) 知覚処理……Hakerem と Sutton は弱い閃光を知覚した時に瞳孔散大が生じることを実験で認めた[7]。つまり瞳孔散大は極めて弱い知覚の指標となりうることを示している。

以上の知見は瞳孔径の変化を測定することが、人間の情報処理活動を探るうえで有効な手段であることを示唆するものである。

眼球運動

人間が対象を見る時の視線の動きには次の2種のものがあることが確かめられている[1][8]。

- (1) 飛越運動（Saccadic Eye-Movement）……これはある注視点から他の注視点への急激な視点の移動である。注視時間の最小値は約 1/5 秒で、サンプル値制御が行われているとみられる。飛越運動は次の注視を行うに要する時間がどの程度かにもよるが約 1/50～1/10 秒程度の間持続する。この場合の眼球運動速度（視角を単位時間で割ったもの）は最高 300deg/sec 以上にもなる。飛越運動は非常に速やかに生じるのでそれは眼球運動に費やされる全体の時間の 10% を占めるに過ぎない。また、視標（注視すべき対象）が動いたあと、飛越運動が開始されるまでの時間の遅れは常に一定で約 0.2 秒である。なお、飛越運動の間は視覚情報は知覚されない。
- (2) 円滑な追跡（Smooth Pursuit Eye-Movement）……これは滑らかに運動している視対象を見る時のみに生ずるもので、対象の動きに従って滑らかに動く。この眼球運動は対象の運動速度が目の刺激となって生ずるものである。この運動の最大速度は 30 deg/sec（Andreassi によると 60deg/sec 以上[1]）で運動中には知覚を生ずることもある。

眼球運動のデータのとり方には、2つの見方がある。1つは視点の動きに関するものであり、もう1つは、眼球内の瞳孔の運動方向である。このうち、後者の運動については、課題解決中に生ずる運動方向と脳機能の側性分化との関連が注目される。言語分析課題の場合に目は右方向へ、空間課題のときには左方向へ動くが、右利きの者の方が側性分化の程度が著しいことを脳波研究で示されている。一方、視点の動きそのものは、被験者が何を見ているのかということを正確に捉えることができることと、視点の軌跡のデータ分析によって、被験者の行動方策の形成過程が探れる可能性があるのではないかと考えている。

瞬目

一般に、瞬目は角膜の湿気を維持していると信じられているが、その機能的価値が完全に解明されているわけではない。瞬目にはいくつかの異なった種類がある[9]。最も一般的なものは、比較的短い時間の随意的な瞼の閉鎖である。これは、他の種類の瞬目と比較して長い持続時間をもつ傾向にあるが、精神活動の影響をあまり受けていないと考えられている。第2の種類は、反射的瞬目である。目に入ったゴミから電気ショック、大きな音まで、多くの刺激によって誘発されるものであり、生体固有の反射とみなすことができる。第3の種類である周期的瞬目は、一般に精神活動に最も深く関わっていると考えられているが、人によって個人差があり1分間当たり1回から50回まで大きく分散している。また、周期的瞬目の機構については第5脳神経（顔面神経）を介し中枢神経系によってコントロールされてい

ると考えられているが、実際はまだよく理解されていない。本研究ではこの周期的瞬目に注目し、実験中の被験者の瞬目と認知行動との関連性の解明も目的の1つとしている。

本項では、人間情報行動計測技術の基礎となる心理生理学について、その概要と、主に視覚系データに関する知見について述べた。次項では、本研究で行う実験の着眼点について述べる。

5.1.3 実験の着眼点

本研究で行う認知心理実験は、得られた各種の実験データから人間の認知情報処理過程を推定できるかどうかを明らかにすることを目的とする。そのため、以下のような生理指標を計測する。

- 瞳孔径
- 眼球運動
- 瞬目
- 心拍数
- 皮膚電位
- 顔面温度
- 呼吸

また、上記の生理指標以外にも実験から得られるデータとして以下のものを収集する。

- 操作記録
- 発話記録

前項で述べたように、本研究では、これらのデータのうち、特に人間の認知過程に深く関係していると思われる視覚系指標に着目している。視覚系指標は、従来までリアルタイムでの計測が困難とされていたが、本研究ではその測定に適切な装置を使用・開発することによってリアルタイムでの測定を可能にする。一方、生理指標のうちでも測定しないものを、その理由とともに以下に挙げる。

- 脳波、事象関連脳電位 ……解析が困難
- 筋電位 ……思考活動に直接関係ない
- 血流量、血圧、酸素消費、唾液分泌 ……リアルタイムでの測定が困難

脳波(Electro-encephalo-gram; EEG)と事象関連脳電位(Event-related brain potential; ERP)は、直接、脳の思考過程を推定できる可能性がある反面、解析が非常に複雑になるため、本研究では測定対象としない。筋電位(Electro-myo-gram; EMG)は、筋線維の収縮に伴う電位を測定するものであり、人間の思考活動には直接関係ないと思われる。血流量、血圧、酸素消費、唾液分泌は、自律神経系の支配を受けていると考えられるものの、リアルタイムでの測定が困難なために測定対象とはしない。

また、本研究では、被験者に認知課題を与えその際の認知情報処理活動を推定するため、その認知課題には適度な難易度の問題が必要である。ここでは、3入力3状態の状態遷移モデルに関する学習と判別を課題とする。2.2.2.3に述べたように Card らのパフォーマンスモデルによると人間が短期的に記憶できるのは、5~9 チャンクであるとされている(チャンクとは情報のまとまりの単位)。3入力3状態の状態遷移モデルは単純に記憶すると最大の情報量が9となり、被験者に与える認知課題として適度な難易度になると考えられる。

本研究では、このような観点から被験者による認知心理実験を行い、被験者から得られる各種のデータを収集・解析することにより被験者の認知情報処理過程を推定しようとするものである。

以下では、5.2節で認知心理実験の方法を説明し、5.3節で操作記録と発話記録の結果と考察を、5.4節で視覚系指標と生理電気信号の結果と考察を述べ、5.5節で実験データによる認知行動の追跡例を示す。最後に、5.6節で本研究をまとめる。

5.2 認知心理実験の方法

5.2.1 被験者に与える認知課題

5.2.1.1 状態遷移モデル

人間のオンライン認知情報処理の特性を調べる基礎認知心理実験の課題として、3入力3状態の状態遷移モデルの組合せを選択した。実験はパソコンを用いてプログラム内の状態遷移モデルに基づいて表示される画面を被験者が見て、(1)そのモデルを学習する過程と、(2)提示された3つの状態遷移モデルのいずれに従って遷移しているかを判別する過程の認知行動を調べるものである。

本研究の実験で用いられる状態遷移モデルは、3つの状態（幾何図形の円、正三角形、正方形、以下○、△、□とする）を持ち、入力キー1、2、3のいずれかに応じて、予め決められた状態遷移表に従ってパソコン画面の表示を変化させ、状態遷移を起こすというものである。被験者は、画面上の状態（○、△、□のいずれかの形）が、入力キーにより変化するようにとらえられることになる。上述の(1)に対応して、被験者自身がディスプレイのタッチスクリーンを指で触れることにより、入力キーを選択するもの（実験1）と、(2)に対応して、パソコンのプログラムが自動的に一定時間間隔で入力キーの選択をランダムに変更するもの（実験2、実験3）とがある。

入力値と状態遷移の関係は、例えば図5-2の様に表現できる（図中の数字は入力値を示す）。図には、この場合の状態遷移表をあわせて示した。

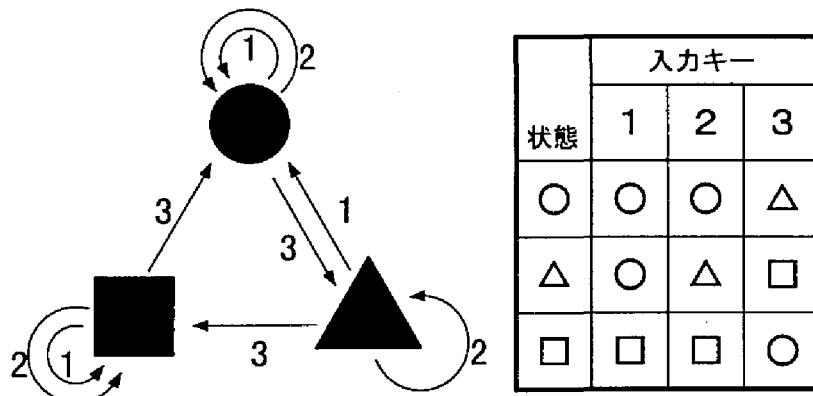


図5-2 状態遷移モデルの図と状態遷移表

ここで用いるような状態遷移モデルの複雑さを示す尺度としてエントロピという概念が提案されている[10][11]。状態遷移モデルの状態が S_i から状態 S_j への遷移確率を P_{ij} とし、また定常過程で状態が S_i となる確率を P_i とすると、1回の状態遷移あたりの平均情報量 I は次式で与えられる。

$$I = \sum_i \sum_j P_i \cdot P_{ij} \cdot \log_2 \frac{1}{P_{ij}} \quad (5-1)$$

これが状態遷移モデルのエントロピである。もしこの量が大きければ、1 回の状態遷移あたりの情報量が大きいので、状態遷移モデルを記憶する上でその負荷も大きく、問題が難しくなるということであろう。

今回行った実験では、3 入力 3 状態のモデルを扱うが、1 つの状態とその遷移先の関係として、図 5-3 と図 5-4 の 2 種の形式に限定した。

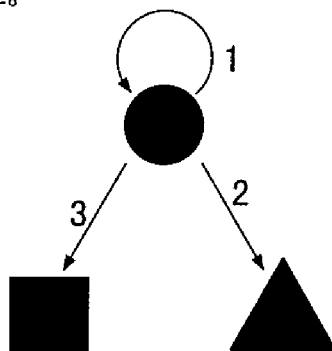


図 5-3 3 つの入力値による状態遷移先が全て異なるもの

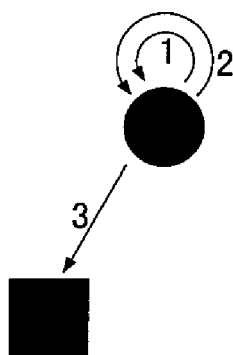


図 5-4 3 つの入力値のうち、2 つの入力による遷移先が現在の状態と同じもの

図 5-3 は、3 つの入力のそれぞれが異なった状態遷移を起こすものである。図 5-4 は 3 種の入力値のうち 2 つによる状態遷移先が自分自身というものである。これらの 2 種のものを 3 つ組合せて図 5-2 の様な状態遷移モデルをつくることを考えると、そのモデルの形は図 5-5 に示すように 5 種類となる。これを以後、「モデルの構造」と呼ぶことにする。

入力値がそれぞれ $P_{ij} = 1/3$ の確率で発生すると仮定すると定常過程の確率 P_i は、

$$\sum_i P_i = 1 \quad (5-2)$$

$$\sum_j a_{ij} \cdot P_i = P_j \quad (5-3)$$

但し、 a_{ij} は、 S_i から S_j への遷移が起こりうる時 $a_{ij} = 1/3$
 S_i から S_j への遷移が起こりえないとき $a_{ij} = 0$

より算出できる。図中には、このようにして求められた P_i および P_{ij} を用いて (5-1) 式によりエントロピを計算してあわせて示している。

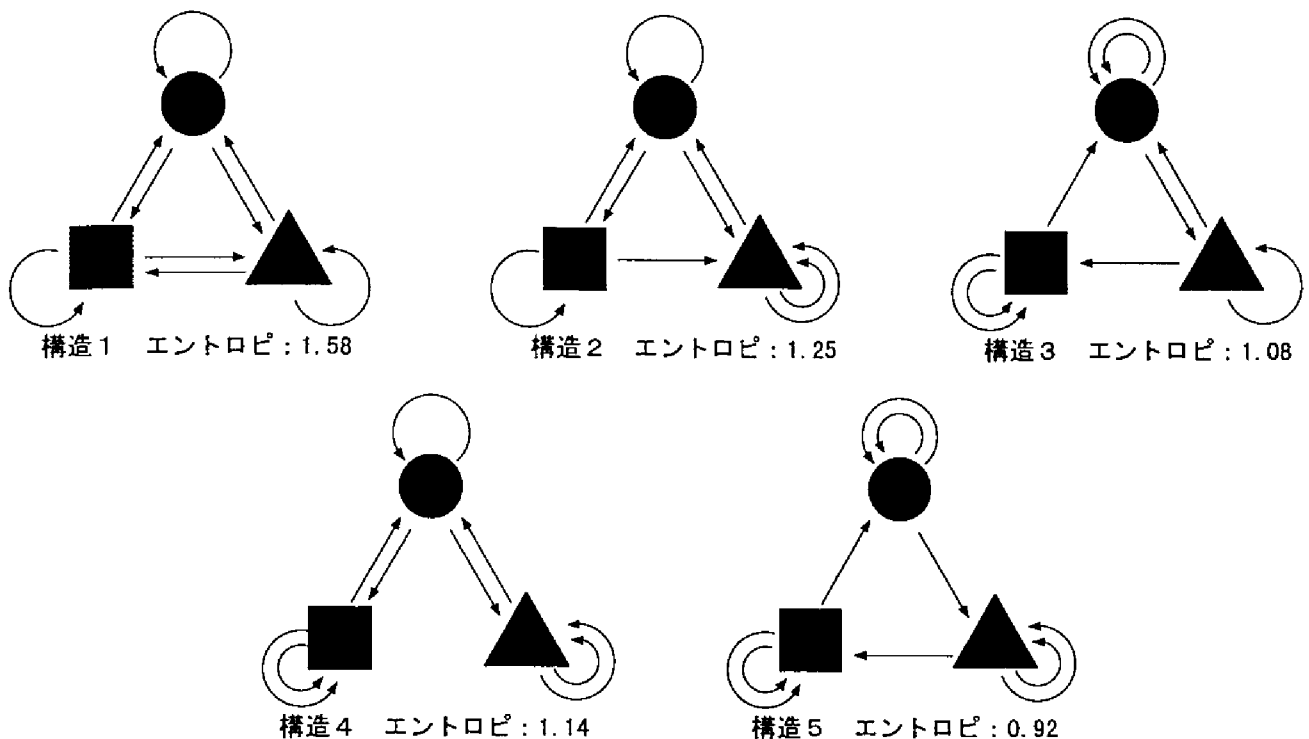


図 5-5 研究で用いる状態遷移モデルの構造とエントロピー

5.2.1.2 実験 1 「学習」課題

実験 1 は、上述の 3 入力 3 状態の状態遷移モデルを被験者が何回かの試行により学習する課題である。課題は、図 5-2 の状態遷移表で示される合計 9 つの規則を見出すものである。人間の短期記憶容量は $7(\pm 2)$ チャンクといわれるが、この課題では 9 つの規則を見出して暗記しなければならない、これを要領よく行うことが問題となる。このような問題に対し被験者がどのようにメンタルモデルを形成していくか、また、どのように問題を解くか（方策形成）の過程を探ると共に、提示される個々の状態遷移モデルが人間にとって理解しやすいかどうかの評価も行うものである。各問題はパソコンによって提示され、被験者はディスプレイ上のタッチスクリーンによって操作を行う対話形式をとっている。

本実験の問題は、練習問題の他に 27 問あり、最初の練習問題で問題の内容や操作の方法をおぼえてもらうようになっている。各問題での実験の流れを以下に示す。

- (1) パソコンにより図 5-6 に示されるような画面が提示される。図中の「State」の右に表示される図形が現在の状態を表している。この状態図には、前述のように、○、△、□の 3 種のものがある。
- (2) 次に被験者は状態図の下に表示されている 1、2、3 の入力キーを指で押し、状態図の変化を調べる。この入力キーが遷移を引き起こし、状態が変化することによって表示される状態図が変わるものである。被験者は、この試行を最高 120 回まで繰返し、状態遷移モデルの構造を理解するように求められる。また、各問題試行中には、Ericsson と Simon の方法に従い^[12]、頭に浮かぶ事をできるだけすべて話してもらい(concurrent verbalization)、後に文書化して被験者が理解に至るまでの方策を探る手懸かりとする。
- (3) 被験者が、問題である状態遷移モデルの構造を完全に理解したと自分自身で判断した時に、図中の「Understand」のキーを押してもらう。その後、学習された状態遷移モデルの構造について口頭で回答してもらう。実験施行者は、「○、△、□の 3 状態に対して各入力キーによりどの状態に遷移するか」を答えるように求める。

- (4) 前半 13 問目までの場合は、次いで被験者に口頭で回答した内容を紙に描いてもらう。これにより、問題の状態遷移モデルがどのようなメンタルイメージで捉えられているかを探る。また、後半の 14 問では画面に状態遷移図が解答として示され、正解であったかどうかを被験者自身にチェックしてもらう。これは、被験者に完全な形の状態遷移モデルのイメージを見せることにより、それをメンタルイメージとして植え付けるためであり、その後の問題でこのメンタルイメージの効果がどのように現われるかを調べる。
- (5) 各問題の最後に、被験者がどのようにして問題を解いていったか、どうして間違ったのかなどを行動を振り返って話してもらう (retrospective verbalization)。

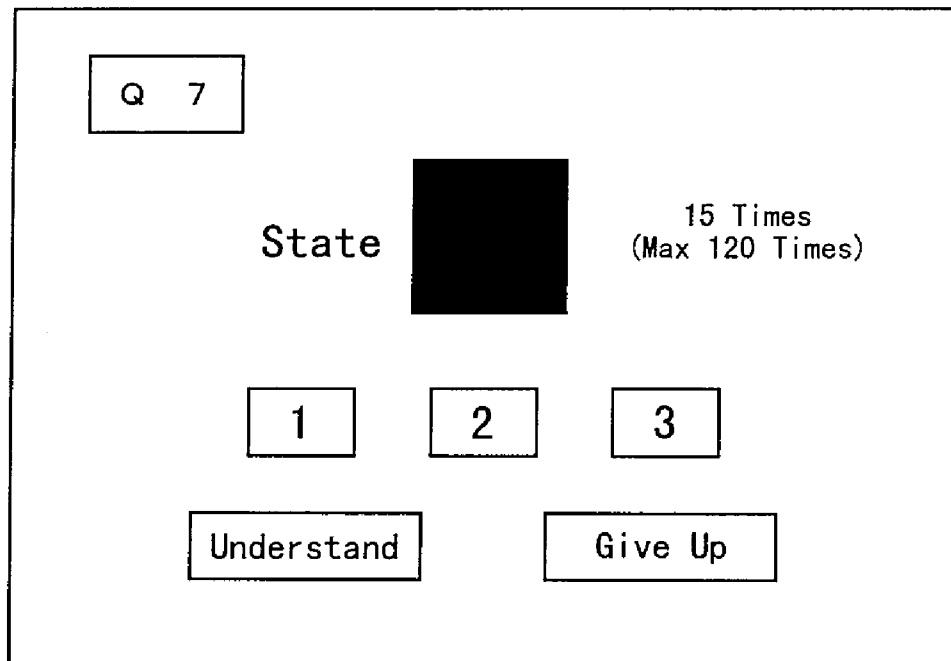


図 5-6 実験1「学習」課題での問題提示画面

本実験では、以上の(1)～(5)を練習問題も併せて 28 回繰返すことになる。なお、23 問目以降は、被験者に与える課題を以下のように変えている。

- 23～27 問……画面中「State」の右に表示される状態図の中央に「丸」、「三角」、「四角」の文字が図形とは無関係に現われる。この文字は現在の状態には無関係であり、被験者にストレスを与えるために表示する。即ち、問題試行中、被験者は、表示されている状態図を見て「まる」、「さんかく」、「しかく」と言語的にラベル付けし、独り言のように話しているので、視覚的に文字としてラベル付けされているものを同時に表示させることにより、視覚情報処理から言語的ラベル付けに至る過程の処理にストレスがかかることになる。この効果は、視覚と言語の処理システムがそれぞれ独立に働いているのではないことを示しているストループの実験によって明らかにされている [13]。
- 24、25 問……この 2 問は、問題となる状態遷移モデルを図 2-6 のように、ある状態 (図中では△)

には遷移しないような構造のものとしている。このような問題とすることで、以前は 3 つの状態図がすべて画面上に表示されていたのに、1 つだけ現われないという予想に反した状況を設定してストレスをかけ、被験者の対処の仕方をみる。

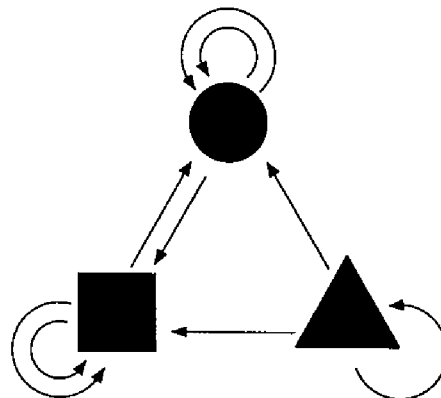


図 5-7 ある状態に遷移しないモデルの例
(図では、他の状態から△に遷移しない)

このように、疲労度も増してきている 23 問目以降に 2 種のストレスをかけ、ストレスに対する被験者の行動についても調べる。

5.2.1.3 実験 2 「判別」課題

本実験は実験 1 のセッションの実施後、被験者に課せられる。実験 1 では被験者がキーを押して状態遷移モデルを理解したのに対し、実験 2 では被験者は自動入力されるキーによる状態の変化を観察することにより、3 つのサンプルから正しい状態遷移モデルを判別するものとした。この実験の目的の一つは、判別のための方策の形成過程を探ることである。即ち、実験 1 と同様に自動的な状態変化の情報だけからモデルを同定した後、3 つのサンプルから選択するのか、あるいは実験 1 とは異なる判別方策を形成するのかを観察するのが一つの目的である。そしてもう一つは視点の動きに関してのデータを得ることである。本実験では、学習課題と異なり、情報を得る位置が数ヶ所あるため、視点の動きからどのように判別の手懸かりを得ているかを確かめることも目的とする。

本実験では、パソコンにより図 5-8 に示されるような画面が提示される。図中「Samples」の上に表示される 3 つの図は、各状態遷移モデルを示すサンプル図であり、「State」の右の状態図は、これらのうち 1 つの状態遷移モデルに従って変化する。また、入力キーは一定時間間隔 (1、2、3 秒) で自動的に選択され、画面上には赤くなって選択されたことを被験者に知らせる。画面に表示されている各サンプルの状態遷移モデルは図 5-8 のようにそれぞれ構造が異なり、被験者は一定時間間隔でランダムに選択される入力キーとその入力キーに従って変化する状態の図形を見て、正しい状態遷移モデルを判別するよう求められる。本実験では、画面に提示されるサンプル図に、入力キーと遷移方向の関連をあらわす番号が表示されていないので、被験者は各状態遷移モデルの構造の違いからだけで判別しなければならない。被験者は、問題がわかった時点で、画面中の正しいと思われるサンプルを指で押しその問題を終了させる。問題試行中は、実験 1 と同様に考えていることを話してもらい、各問題終了後には、回答に至るまでの判別過程を振り返って話してもらう。

本実験の問題は全部で 69 問あり、1～23 問、24～46 問、47～69 問は同じ問題でありサンプル図も同一であるが、入力キーの間隔がそれぞれで異なる。即ち、1 問目、24 問目と 47 問目は同一問題であるが、入力キーの間隔が 1 秒、3 秒、2 秒というように異なっているのである。入力時間間隔は 1 問目から順に 1 秒、2 秒、3 秒、1 秒、2 秒、3 秒……となっている。

また、本実験でも、ストレスの効果を調べるため、23 問目、46 問目と 69 問目の問題を変えている。この問題では、画面に提示されるサンプル図の中で正しい状態遷移を示す図が 2 つある。これによって、被験者が予想していた問題と異なるためにある程度のストレスを受けると考えられる。

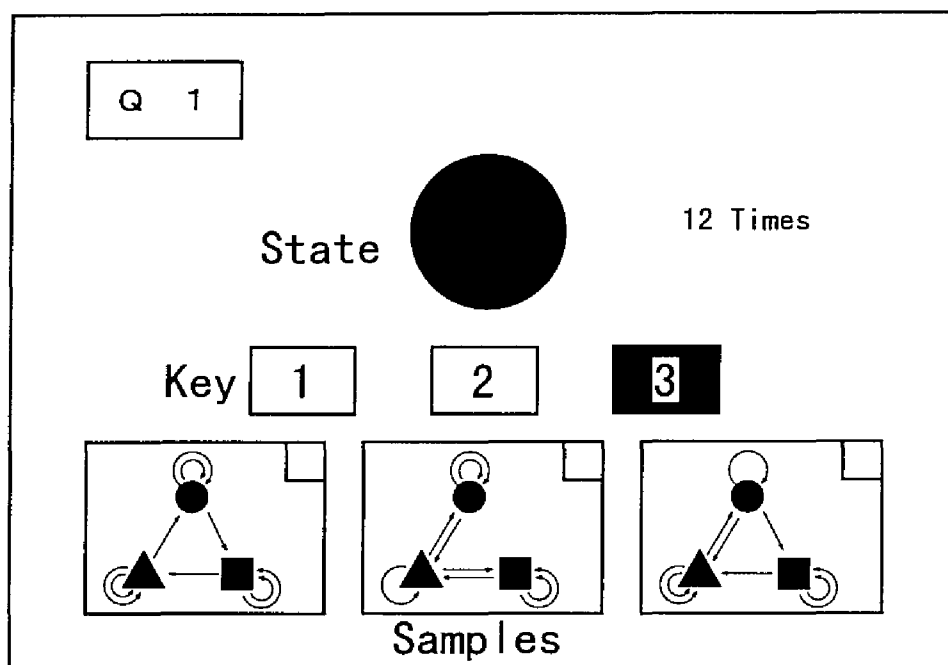


図 5-8 実験2「判別」課題での問題提示画面

5.2.1.4 実験3 「判別」課題

この実験では、実験2と同様に判別のための方策の形成過程を探るものである。実験方法は、実験2とほぼ同じであるが、問題となるサンプルが異なる。実験3では、図5-9に示すように、状態遷移モデルの構造は同じであるが、遷移方向をあらわす矢印と入力キーの関係が異なる。

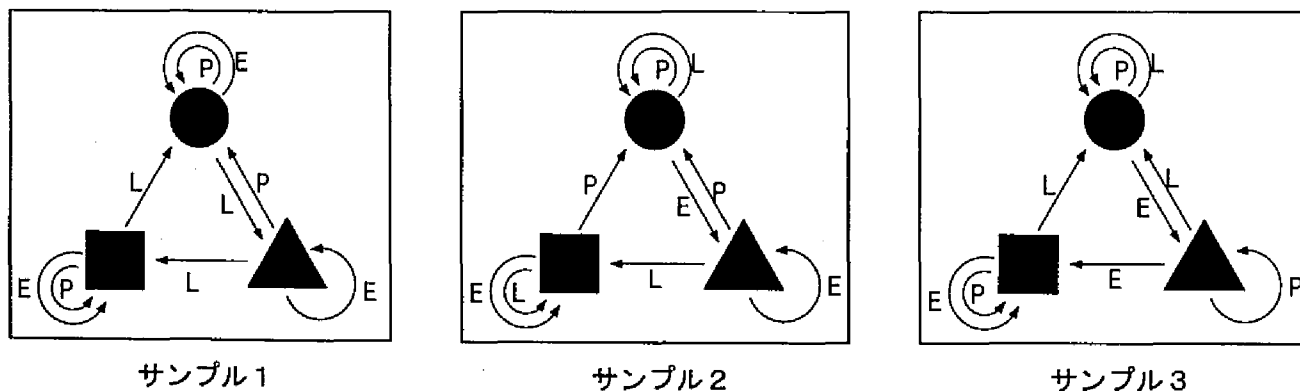


図 5-9 実験3で提示されるサンプル図の例

図中の E、P、L は画面上の入力キー 1、2、3 のいずれかに対応するが、各問題ごとに対応関係が異

なる。本実験では、入力キーが選択される間隔は全て1秒間隔であり、各サンプル間の違いを入力キー、状態図、サンプルの3つから判別しなければならないことから実験2に比べ難しくなっている。問題は全部で20問あり、全て異なった問題である。また20問目は、実験1、2と同様に被験者にストレスをかけるため、問題を変えてある。この問題は、サンプルの状態遷移モデルの構造がそれぞれ異なり、実験2と同様の方策で判別できるものであるが、被験者には、予想していたサンプルと異なるためストレスがかかると考えられる。

5.2.2 実験時のシステム構成

実験時のシステム構成を図5-10に示す。

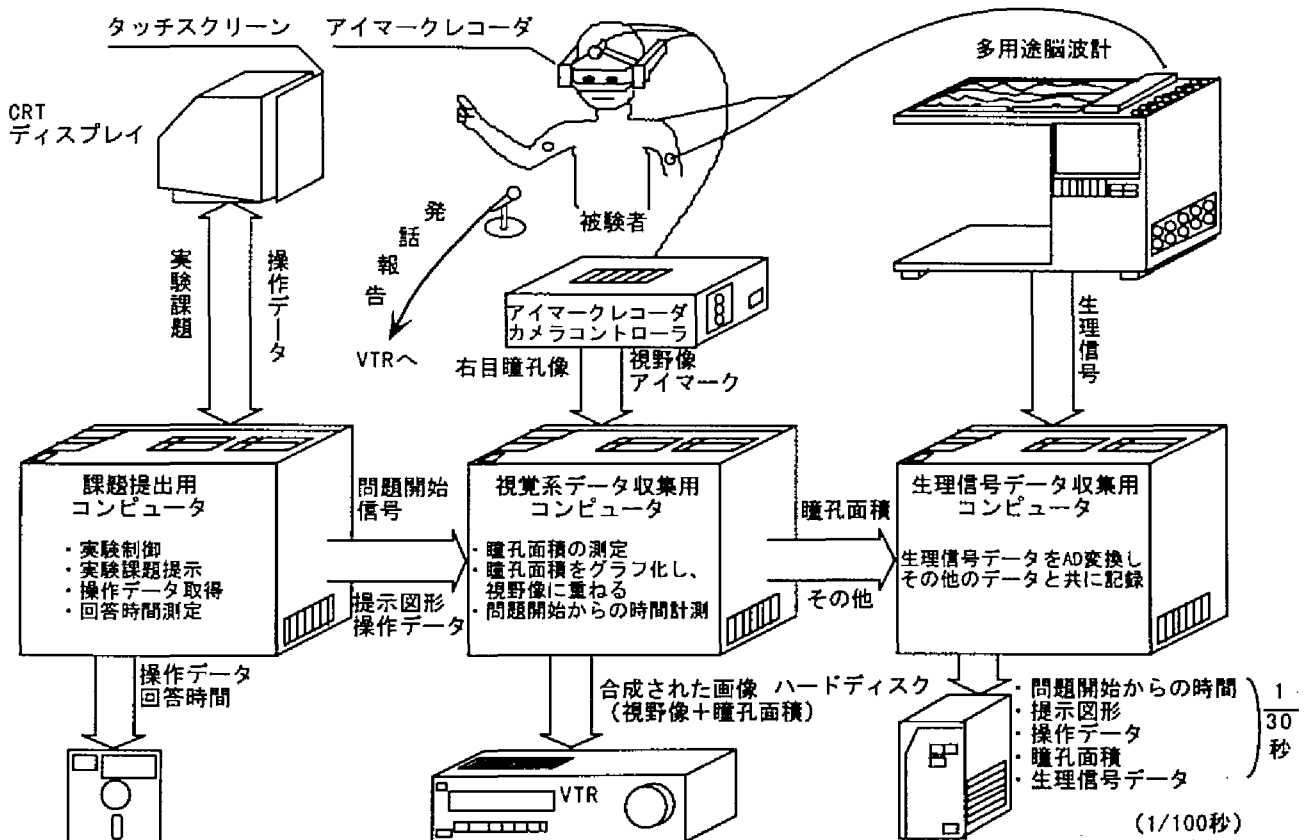


図5-10 認知心理実験時のシステム構成

実験中は被験者にアイマークレコーダ^[14]および各生理信号データを収集するための電極、温度センサ等を装着してもらう。実験時のシステムでは、アイマークレコーダ、多用途脳波計、VTRの他に課題提示、視覚系データ収集、各種生理信号データ収集のため3台のパーソナルコンピュータを用いる。この3台のコンピュータは、それぞれ図中のように接続されており、実験中リアルタイムでデータを送出し、受け取るようになっている。以下に各コンピュータの役割と扱うデータおよびその周辺機器について説明する。

(1) 課題提示用コンピュータ

このコンピュータは、CRTディスプレイとタッチスクリーンを用いて被験者に課題を提示する

ことを主な目的としている。実験中は、問題開始信号、問題番号、表示されている状態図、被験者の操作データ等を、セントロニクス準拠パラレルインタフェースで視覚系データ収集用コンピュータに送ることにより他の2台のコンピュータの制御を行っている。また実験後には、予め実験中に蓄えられた操作データや回答時間などをフロッピーディスクに記録する。

(2) 視覚系データ収集用コンピュータ

主に、アイマークレコーダカメラコントローラより得られる NTSC 画像信号の右目瞳孔像を 1/30 秒ごとに画像処理し、測定された瞳孔面積をリアルタイムで計算すると共に、アイマークレコーダカメラコントローラより得られるアイマークの重畳した視野像にグラフ化してスーパーインポーズする。この処理には、特別なハードウェアを使用するが、詳細は次項で述べる。また、視野像には同時に問題番号、本コンピュータで計測している問題開始から時間を 1/30 秒単位 (NTSC 画像の 1 フレーム) でスーパーインポーズし、VTR に記録する。VTR には音声部分に、実験中の被験者の発話も同時に記録する。視覚系データ収集用コンピュータは、測定された瞳孔面積、問題開始からの時間などを、課題提示用コンピュータから送られてきた提示図形や被験者の操作データと共に RS-232C を介して生理信号データ収集用コンピュータに送出する。

(3) 生理信号データ収集用コンピュータ

多用途脳波計より得られるアナログ信号の各種生理信号データを 1/100 秒ごとにサンプリングし、それを AD 変換して視覚系データ収集用コンピュータより送られてくる各データと共にリアルタイムでハードディスクに記録する。収録している生理信号データは、心電図、左掌の皮膚電位、顔の表面温度、呼吸曲線である。

これらのシステムにより、実験中はハードディスクに 1/100 秒ごとの各種生理信号データと 1/30 秒ごとの問題開始からの時間、提示されている状態図、被験者の操作データおよび瞳孔面積が記録される。また VTR には、被験者の視野像に視点の位置を示す十字のアイマーク、および、グラフ化された瞳孔面積、問題番号、時間などがスーパーインポーズされた画像が記録される。全問題終了後には、課題提示用コンピュータに蓄えられた操作データや各問題の回答時間がフロッピーディスクに記録される。実験後は、このようにして得られた各種データを用いて解析を行う。

5.2.3 アイマークレコーダを用いた視覚系指標測定分析法の研究

従来の研究では、瞳孔径を測定するため実験中にアイマークレコーダで撮影した瞳孔像を VTR に記録しておき、実験後、汎用画像処理装置を用いてデータ処理を行っていた。この場合、1 フレームの画像を処理するのに 30 秒以上もかかるので、例えば 1 分間の画像を処理するには 15 時間もの時間がかかる。本研究では、この点を克服するためリアルタイムで処理できる画像処理装置を製作した。本項では、この装置に関連してアイマークレコーダとその周辺機器、および製作した画像処理装置について述べる。

5.2.3.1 アイマークレコーダとその周辺機器

前述の各実験の際、被験者が装着する(1)アイマークレコーダは、測定中およびデータ収集時に(2)アイマークレコーダカメラコントローラ、(3)アイマークレコーダデータアウトプットユニット^[15]を使用する。以下に、この3装置について簡単に説明する。

(1)アイマークレコーダ

アイマークレコーダは、図 5-11に示すようにゴーグルのような形をしており、ゴーグルの左右にある 2 つの赤外線カメラと頭頂部の視野像撮影用カメラの他に、左右の眼を照らす 2 つの赤外線 LED から構成されている。

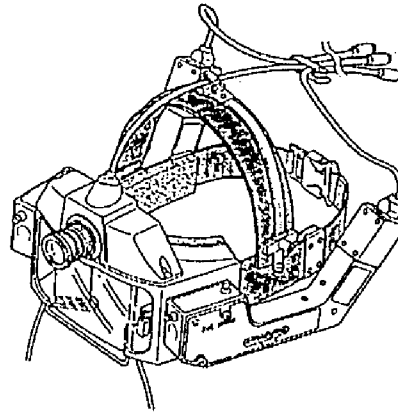


図 5-11 アイマークレコーダ

頭頂部についた視野像撮影用カメラは、被験者の眼の位置より上についているため被験者と全く同じ視野像を得ることはできないが上下にある程度角度をかえられるため、本実験のように視野があまり移動しない場合には問題とならない。右側に付属している瞳孔像撮影用赤外線カメラは、赤外線 LED の照明により被験者を眩惑することなく明るい像を得ることができる。また照明と撮影に赤外線を用いているため、瞳の虹彩の部分は赤外線を反射して白く映り、瞳孔だけが黒く撮影できる。左側に付属している視点位置計測用赤外線カメラは、眼球の角膜で反射される赤外線 LED の像をとらえることにより眼球の回転角度を調べる。図 5-12のように眼球の回転中心位置と水晶体の中心位置が異なるため視線が移動することにより眼球が回転するとカメラに撮影された LED の反射像が動くことになる。これら 3 つのカメラでとらえられた映像をアイマークレコーダカメラコントローラにより合成し視点の位置や瞳孔像を得る。

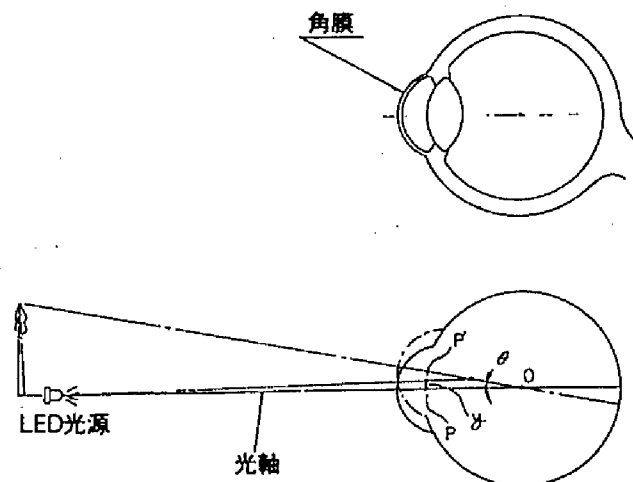


図 5-12 アイマークレコーダによる視点位置計測の原理

(2)アイマークレコーダカメラコントローラ

この装置は、主に左側の視点位置計測用カメラより得られた LED の反射像を処理し視野像撮影用カメラで撮影された映像と合成して、視野像に視点の位置が白い十字（アイマーク）で重畳された画像を得るために用いられる。この画像は NTSC コンポジット信号に準拠しており、各フィールドの水平走査線の 240 本目以降、垂直同期信号までの間に視野像上でのアイマークの水平、垂直位置を符号化して出力する。なお符号化の際に、水平方向には 0~319、垂直方向には 0~239 と数値化されている。また、アイマークレコーダの右側のカメラでとらえられた瞳孔像も同時に NTSC コンポジット映像信号として出力される。

(3)アイマークレコーダデータアウトプットユニット

この装置はアイマークレコーダカメラコントローラにより視野像の下側に符号化されて記録されているアイマークの位置コードをデジタル信号に変換しコンピュータに送出するものである。しかしこの変換処理には 1 フレーム当たり最短でも約 67ms かかるためリアルタイムで処理することはできない。そのため本研究では前述のように実験中 VTR に視野像を記録し、実験後にアイマーク位置データを収集する方法を用いている。

このようにアイマークレコーダを用いることにより、視点の位置が白い十字で示されている視野像とその位置データ、および瞳孔像が得られる。

5.2.3.2 瞳孔面積測定のための画像処理装置の製作

本研究では、アイマークレコーダより出力される瞳孔像を利用して瞳孔の大きさ、および瞬目を測定するため瞳孔面積測定用の画像処理装置を製作した。この装置により、汎用画像処理装置を用いる方法ではできなかったリアルタイムの測定を可能にし、そのデータを視野像にスーパーインポーズすることにより実験中に被験者の瞳孔面積変化を直接観察できるようになった。本項では、この装置の概略、設計での留意点について述べる。

装置の概略

アイマークレコーダより出力される瞳孔像は、白黒の NTSC ビデオコンポジット信号であるため、本装置ではカラーバースト信号は扱わず輝度信号のみを扱う。対象とする瞳孔像は図 5-13 のように瞳孔部分だけが暗く映像化されているので、輝度信号を二値化し、ある一定のレベル以下の部分を瞳孔とみなすことにする。

また、この図からもわかるように、照明に赤外線 LED を用いているため照明が弱く画像の端の方が暗くなっている。二値化する場合、この暗い部分まで瞳孔とみなされないように画像上にウインドウを設け、そのウインドウの範囲の中で暗い部分を計測の対象とするようにしている。このウインドウは図 5-14 のように左右の二つに分割されており、中心線を瞳孔の中心位置に合わせることで左右別々に瞳孔面積を測定し、瞳孔面積だけでなく水平方向の眼球運動も併せて計測できる。

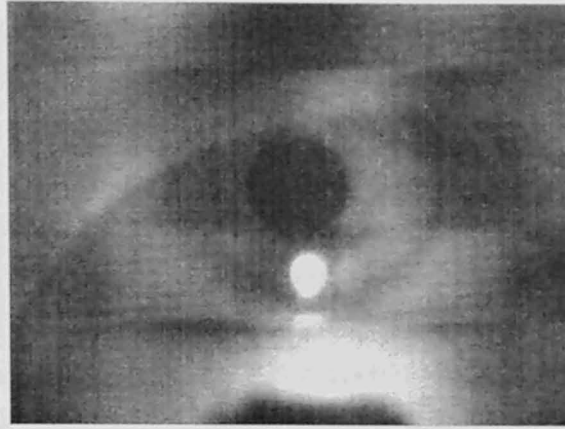


図 5-13 アイマークレコーダで撮影された瞳孔像

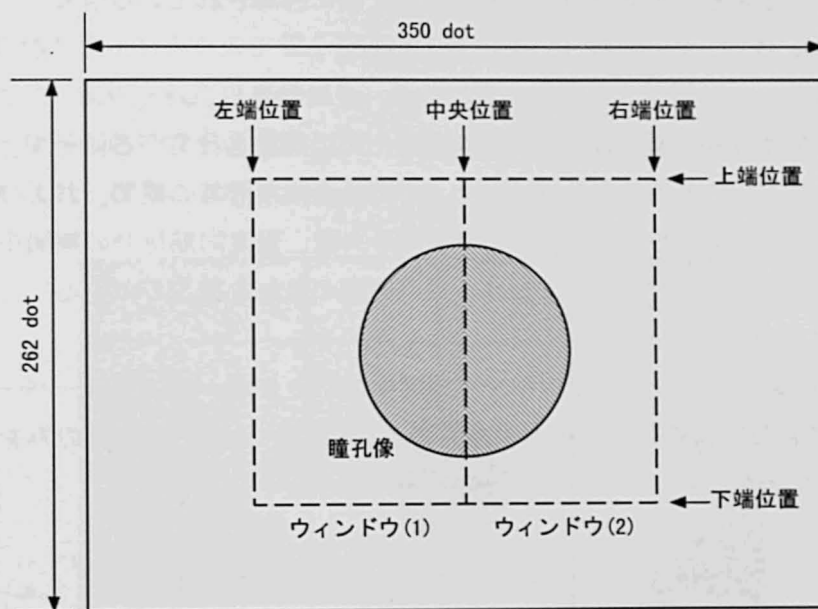


図 5-14 瞳孔面積測定のためのウィンドウ設定

しかし、ここで計測される水平方向の眼球運動については、実験中にリアルタイムで表示させるだけにとどめ、実験後の解析には代わりにアイマーク位置データを用いている。一方、瞳孔面積を数値化するには、画像を小さな正方形のドットに分解し二値化された輝度信号の黒い部分の総ドット数を面積としている。また、本装置はリアルタイムで瞳孔面積を計測しコンピュータに送出する必要があるため、コンピュータと密に結合しているのが望ましい。本研究では、ホストコンピュータに NEC 製 PC-9801 を用い、その拡張 I/O スロットに製作した装置を挿入している。即ち、ホストコンピュータ側からみれば一種の I/O 装置となるように設計されている。また、計測された瞳孔面積をリアルタイムでグラフ化して視野像にスーパーインポーズする必要があるため、計測用ソフトウェアは高速処理が可能なアセンブラを用いて作成した。

NTSC ビデオコンポジット信号

ここで、本装置で取扱うビデオコンポジット信号について簡単に説明する。ビデオコンポジット信号は、テレビ画面上に明暗の情報を表示するビデオ信号の部分と走査線の画面位置を指示する同期信号の

部分に分けて考えることができる。言い換えれば、同期信号はビデオ信号を伝達するための手段であって明暗の情報はもっていない。ビデオコンポジット信号がどのような情報をもっているかを大別してみると以下ようになる。

(1)明暗の情報

被写体が明るい、即ち反射率が高いとビデオ信号レベルは大きくなる。この明暗の情報は輝度信号と呼ばれる。

(2)分解能の情報

細かい被写体まで表示できる信号を解像度が高いといい、周波数としては 0~6MHz 程度の帯域をもっている。

(3)水平同期信号

水平同期信号は画面の水平方向の同期をとるために付加されている信号で、1 走査線に 1 パルス、1 フレーム (2 フィールド) に 525 パルスある。

(4)垂直同期信号

垂直同期信号は画面の垂直方向の同期をとるために付加されている信号で、1 フィールドに 1 パルス、1 フレームで 2 パルスある。また、この垂直同期信号の期間、およびその前後に等価パルスの入っている同期信号もある。この等価パルスは、垂直同期信号の期間中になくなる水平同期信号の代わりをして、画面上部における水平同期の乱れを補正している。

(5)カラーバースト信号

カラー信号の場合は、水平ブランキング期間中のバックポーチにカラーバースト信号が挿入されており、この位相を基準にして色が再現される。本装置では、白黒信号のみを取扱うためカラーバースト信号は考慮していない。

設計上の留意点

このような NTSC ビデオコンポジット信号を取扱う本装置の設計にあたり、留意した点について以下に述べる。

(1)基準クロック

本装置では、画面を小さなドットに分解して面積を測定するためにドットが正方形でなければ面積とみなすことができない。NTSC ビデオコンポジット信号は 1 フィールドあたり水平走査線が 262.5 本あるため画面の垂直方向を 262.5 分割し、走査線 1 本を垂直方向のドットの 1 単位としている。テレビ画面の縦横比は、3:4 となっているため、 $3:4=262.5:350$ により水平方向には画面を 350 分割し、水平方向のドットの 1 単位とする。また、表 3-1 より 1 走査線は、 $63.5556 \mu s$ であり、そのうち水平ブランキングが $10.9 \mu s$ あるのでビデオ信号は 1 走査線あたり約 $52.7 \mu s$ となる。これを 350 分割すると水平方向 1 ドットあたり $0.151 \mu s$ となり、基準クロックは 6.6MHz となることがわかる。本装置では、これに近い値として 25MHz の水晶発振回路を 4 分周して 6.25MHz としている。これは、ほぼビデオ信号の周波数帯域の上限に近いため、解像度は問題ないといえる。

(2)二値化

前述のようにビデオ信号は周波数帯域が 6MHz 程度までであるため、二値化の際に用いるコンパレータには上限周波数の高いものが必要である。高速コンパレータ LM319 は上限周波数が

10MHz 以上あり、出力がオープンコレクタとなっているため、デジタル回路とのインタフェースを考慮して本装置に用いた。また、二値化の基準電位は、逐一変化させる必要がないためポテンションメータによる半固定式とした。

(3) ウィンドウ

前述のように瞳孔面積を測定する際には二つのウィンドウを設定し、その中の黒い部分のドット数をコンピュータに送出するようになっている。このウィンドウはホストコンピュータから設定する。設定には、図 5-14 に示すようにウィンドウ左端位置、ウィンドウ中央位置、ウィンドウ右端位置、およびウィンドウ上端位置、ウィンドウ下端位置を 8bit データによって指定する。この際、ハードウェアの簡略化のため垂直方向には走査線の 256 本目以降は指定できない。また、水平方向は偶数ドット位置(0~174)のみとして、8bit 内に収まるようにしている。

(4) モニタ出力

二値化の状態やウィンドウの位置を確認するためモニタ画像を出力するようにした。二値化の状態については二値化された白黒画像を、そしてウィンドウの位置については各端線および中央線を背景色と反対の色で表すようにした。これにより二値化の際の基準電位やウィンドウ位置の設定を確認しながら行うことができる。このモニタ画像の例を図 5-15 に示す。

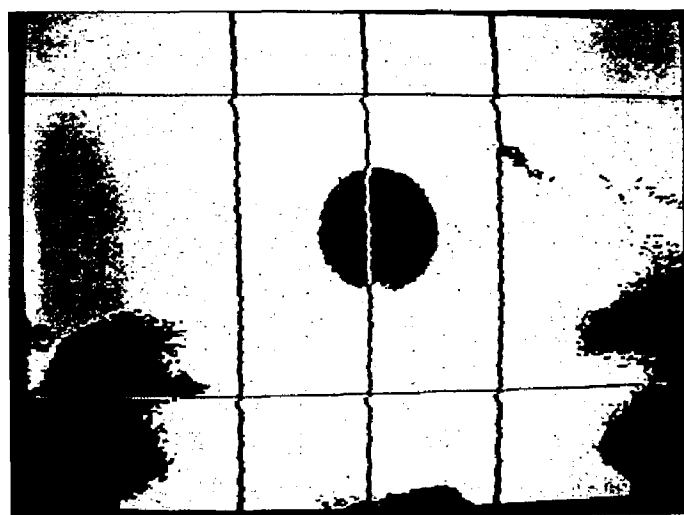


図 5-15 二値化の状態やウィンドウ位置を確認するためのモニタ画像

(5) I/O ポートアドレス

本装置をコンピュータ側からみた場合の I/O ポートアドレスと入出力するデータを表 3-2 に示す。ここにあるステータスポートには垂直同期信号、水平同期信号、および二値化されたビデオ信号が下位ビットから順次入力される。また、コントロールポートは、汎用パラレル I/O ポート LSI である 8255A の各ポートの入出力を設定するのに用いる。計測データ入力用ポートは 16bit であり上位下位に分けて表に示した。

以上のような点に留意して製作された瞳孔面積測定用の画像処理装置により各フィールド終了後に、左右のウィンドウ内の瞳孔面積が得られる。なお、本装置では 1 秒間に約 60 回瞳孔面積をサンプリングできるが、本研究では 30 回としている。また、回路構成の詳細は付録 D に示す。

表 5-1 I/O ポートアドレスとデータの種類

I/Oポート アドレス	入出力 (I/O)	データの種類
80D0H	出力	ウィンドウ(1)左端位置
80D1H	出力	ウィンドウ(2)右端位置
80D2H	出力	ウィンドウ上端位置
80D3H	出力	ウィンドウ下端位置
80D4H	出力	ウィンドウ中央位置
80D6H	出力	コントロールポート1
80D7H	出力	コントロールポート2
80D8H	入力	ウィンドウ(1)内面積データ(下位)
80D9H	入力	ウィンドウ(1)内面積データ(上位)
80DAH	入力	ウィンドウ(2)内面積データ(下位)
80DBH	入力	ウィンドウ(2)内面積データ(上位)
80DDH	入力	ステータスポート

5.2.4 データ解析時のシステム構成

実験後のデータ解析のためのシステム構成を図 5-16 に示す。

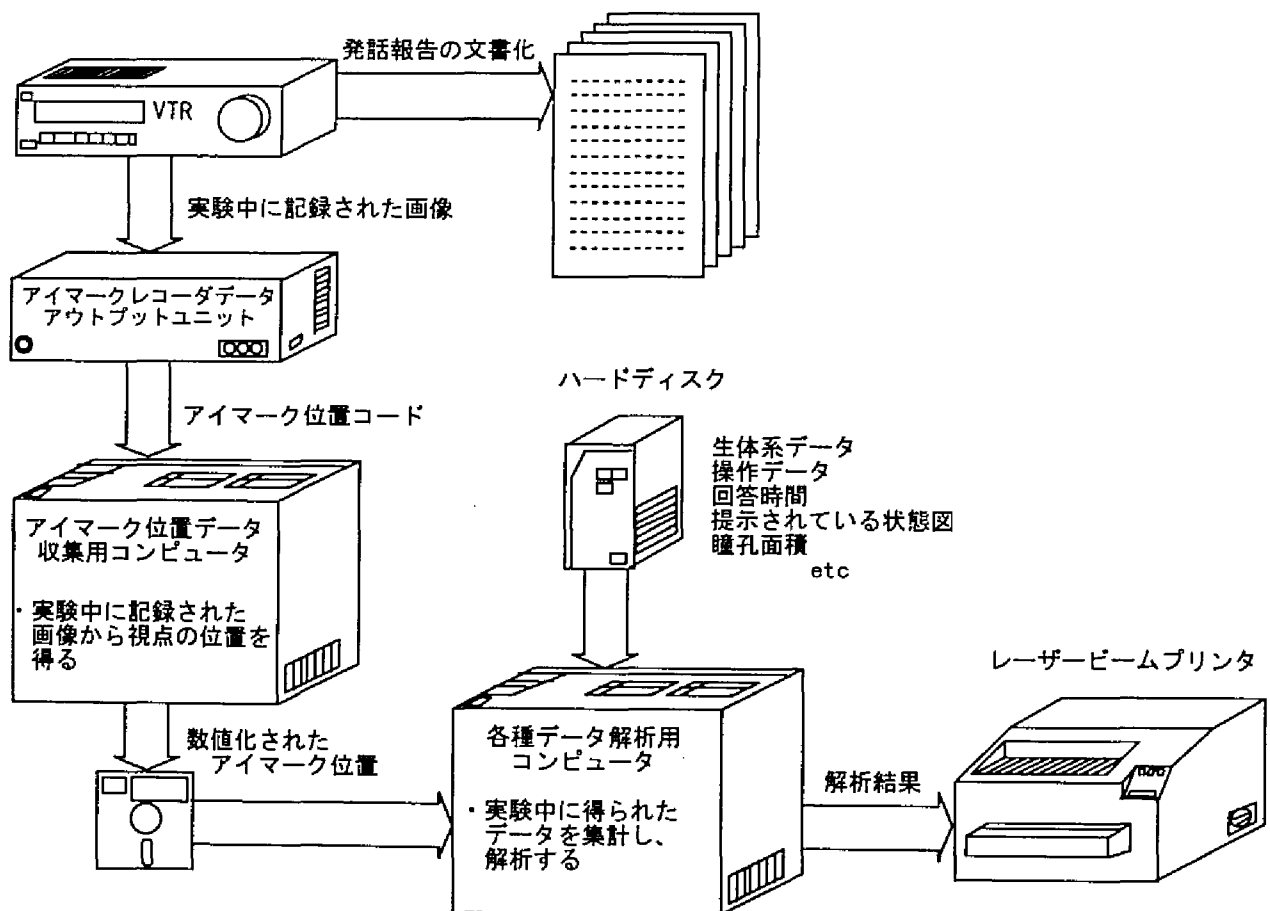


図 5-16 実験データ解析時のシステム構成

まず、実験中にリアルタイムで処理できない発話報告の文書化と、アイマーク位置コードの収集を行う。VTR の音声部分に記録された被験者の発話報告は、実験者が聞きとってワープロで文書化する。

これは、後で問題を学習、判別する際の被験者の採った方策を知る手懸かりとなる。また、実験中に VTR に記録された画像の下側画面の外に、アイマークレコーダカメラコントローラによりアイマークの位置コードが符号化され記録されているので、このアイマーク位置コードをアイマークレコーダデータアウトプットユニットを用いてデジタル化し、RS-232C を介してアイマーク位置データ収集用コンピュータに取り込み、フロッピーディスクに記録する。アイマークレコーダデータアウトプットユニットの詳細については、文献[15]に譲る。ここで得られたデータを用いて、解析時には被験者の視点の移動速度分布や見ている場所、サッケード運動の比率等を計算する。各種生理信号データや被験者の操作データ、瞳孔面積等は、ハードディスクに記録されており、前述のアイマーク位置データと共に解析用のコンピュータで解析を行い、グラフ化された結果等をレーザープリンタに出力する。

5.2.5 実験データのタイムライン表示

実験中にハードディスクに蓄えられる種々のデータや、実験後に VTR より得られるアイマーク位置データはすべて数値化されており、またその量も膨大なもの（実験 1、2、3 合わせて 20MB 以上）となるが、実験データの分析を容易にするため、異なった時系列データについて各問題開始からの時間を基準にグラフ化して出力するようにした。実験より得られる被験者のデータは、視覚系データとして(1)瞳孔面積、(2)視野像上でのアイマーク位置、問題に関して(3)提示されている状態図、(4)入力キー、また生理信号データとして(5)心電図、(6)左掌の皮膚電位、(7)顔の表面温度、(8)呼吸曲線である。これらをグラフ化して出力する際に、(2)アイマーク位置を、(2-1)アイマーク水平位置、(2-2)アイマーク垂直位置、(2-3)アイマークの移動速度、また(5)心電図を、(5-1)心拍数とデータ変換して出力する。このようにして得られたデータをレーザービームプリンタに出力した例を図 5-17 に示す。この出力は各問題開始からの時間を左から右へとっており 1 枚につき 1 分間となっている。ここでは、例としてある被験者が行った実験 2 判別課題の問題 33 を示した。上から順に(1)瞳孔面積、(2-1)アイマーク水平位置、(2-2)アイマーク垂直位置、(2-3)アイマークの移動速度、(3)提示されている状態図、(4)入力キー、(5-1)心拍数、(6)左掌の皮膚電位、(7)顔の表面温度、(8)呼吸曲線である。ここで、出力された各データについて簡単に説明する。

(1)瞳孔面積

瞳孔面積測定用画像処理装置で得られた瞳孔面積を表す。図中で急激に減少するところは瞬目によるものである。

(2-1)アイマーク水平位置

グラフ上端が視野像での左端、下端が視野像での右端である。

(2-2)アイマーク垂直位置

グラフ上端が視野像での上端、下端が視野像での下端である。

(2-3)アイマーク移動速度

点線が 100deg/sec の線であり、これ以上がサッケード運動と考えられる。また、このグラフの横軸に問題開始からの時間が 10 秒ごとに示されている。

(3)状態図

提示されている状態図（○、△、□）を示す。下の"|"はその状態図に変わった瞬間を表す。

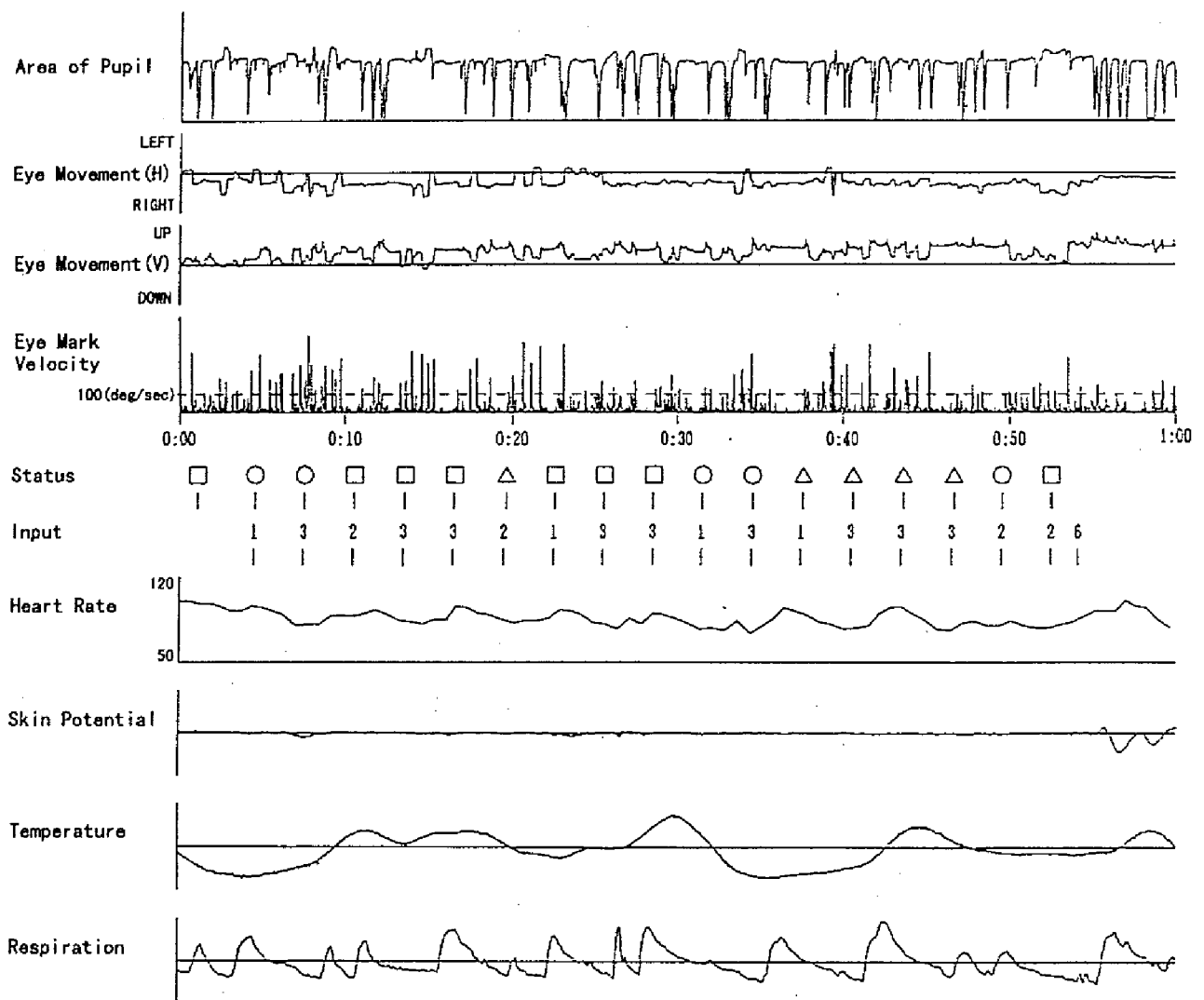


図 5-17 実験で得られた各種のデータのタイムライン表示

(4)入力キー

遷移が起こる際に入力されたキーを示す。図中の 1、2、3 はそれぞれ入力 1、2、3 に対応する。また、実験 1 では被験者の「understand」のキー入力に 4 を対応させ、実験 2、3 では被験者が回答したサンプル 1、2、3 に対応して、4、5、6 を対応させている。図 5-17 は、入力時間間隔 3 秒のため 1、2、3 が 3 秒毎に自動的に入力されている。

(5-1)心拍数

心電図の R 波と次の R 波の時間間隔 ΔT (秒) から心拍数 HR を次式で計算し、グラフ化している。縦軸の上端は 120 回/分であり、下端は 50 回/分である。

$$HR = 60 / \Delta T \quad (\text{回/分}) \quad (5-4)$$

(6)左掌の皮膚電位

不活性な部分である左手甲を基準として左掌との電位差をとったものである。

(7)顔の表面温度

被験者の顔の表面温度を温度センサにより測ったものである。

(8)呼吸曲線

被験者の呼吸を表したものであり、上昇が吸気、下降が排気である。

このようにして出力されたデータは1分間のものであり、問題が1分間以上にわたる場合は数枚に分けて出力される。また、各問題で得られる出力は問題開始から次の問題開始までである。

5.3 実験結果と考察1（操作記録と発話記録）

本節では、前節で述べた方法により行った実験から得られたデータのうち、認知課題を遂行中の操作記録と発話記録に基づき被験者の認知行動に関して解析を行った結果とその考察について述べる。

これらの操作記録や発話記録から得られる情報だけを用いて、被験者の内面状態を直接推定できるわけではないが、相互適応型インタフェースを実現する上では、本節で行うような解析から、与えられた認知タスクと人間の認知行動特性との関連性を調べるのは重要であると考えられる。すなわち、被験者が行った操作だけからその被験者の認知状態を把握するのは非常に困難であるが、その際の認知タスクとの関連性からある程度被験者の内面状態を推定する手懸かりを得ることができると思われる。また、認知タスク遂行中の被験者の発話は、被験者が着目していることや認知状態を直接知りうる点で非常に有効であると考えられるが、現在のところ被験者が自由に発話する内容をリアルタイムで解析する有効な手法がないために、5.2.4項で述べたように実験後に文書化し解析を行わざるを得ない。

以下では、5.3.1項で問題の難易度、5.3.2項で判別課題における解答の手懸かりとなる遷移、5.3.3項でメンタルイメージ、5.3.4項でストレスを与える問題について解析する。

5.3.1 問題の難易度

学習課題、判別課題の各問題は同じような3入力3状態の状態遷移モデルを用いているが、実験結果では被験者により、また各問題により回答時間が非常に変動することが観察された。そこで、これには提示した各問題が状態遷移モデルによって難易度に差が生じているものと考えて、実験毎に各々の問題の難易度を考察する。

5.3.1.1 実験1における問題の難易度

3入力3状態の状態遷移モデルを用いた学習課題は、結局3つの状態から3つの入力に対する遷移先を、全部で9つ記憶するという問題に帰着する。本研究で用いた状態遷移モデルは、図5-3と図5-4を組み合わせてつくったものであるが、図5-3の場合と図5-4では記憶するのに必要なチャンク数が異なる。そこで5.2.1で述べた遷移1回あたりの平均情報量であるエントロピがそのモデルを学習するのに必要な記憶量に関係があり、ひいては問題の難しさに関係があると考えた。図5-18に状態遷移モデルのエントロピとそのモデルを学習するのに要した時間との関係を示す。

図中で横軸はエントロピであり、縦軸は回答時間である。また母集団である被験者は5名であり、各人の練習問題と23問目以降の特異な問題を除く22問の回答時間を用いている。図中の○印は、そのエントロピを有する状態遷移モデルの問題の回答時間の平均値であり、縦棒はその標準偏差を表す。図からも明らかなようにエントロピが大きいほど回答時間の平均値が大きくなり、その標準偏差も大きくなるが、回答時間の平均値が大きいのは、エントロピが大きいほど記憶量が増え、難しくなるためと考

えられる。一方、エントロピが大きくても後述のパタンの存在により学習に必要な記憶量を軽減できると回答時間も短くなる可能性がある。その結果、平均回答時間の長いエントロピの大きい問題では回答時間のばらつきが大きくなり、標準偏差も大きくなる。

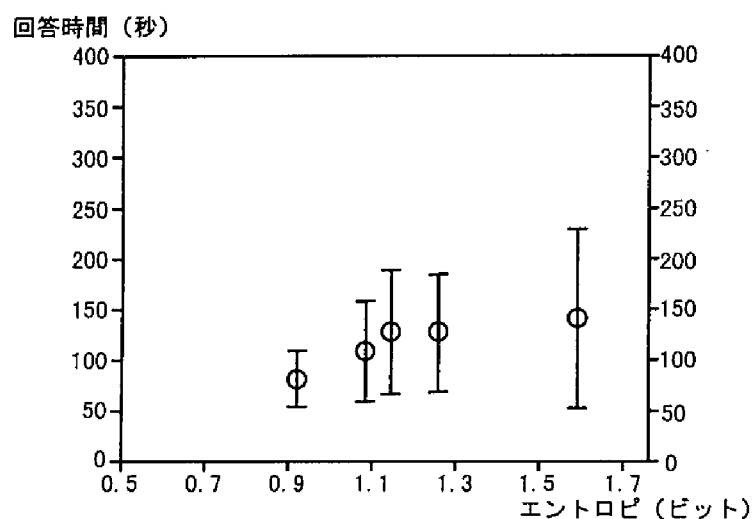


図 5-18 実験1における問題のエントロピと回答時間の関係

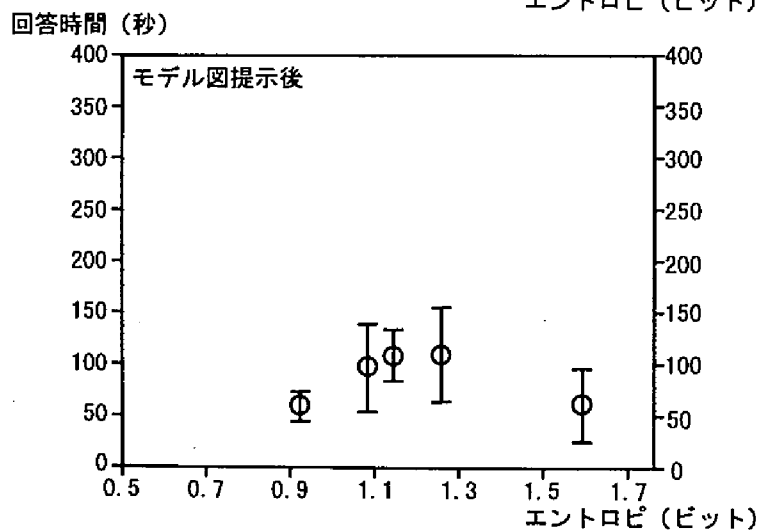
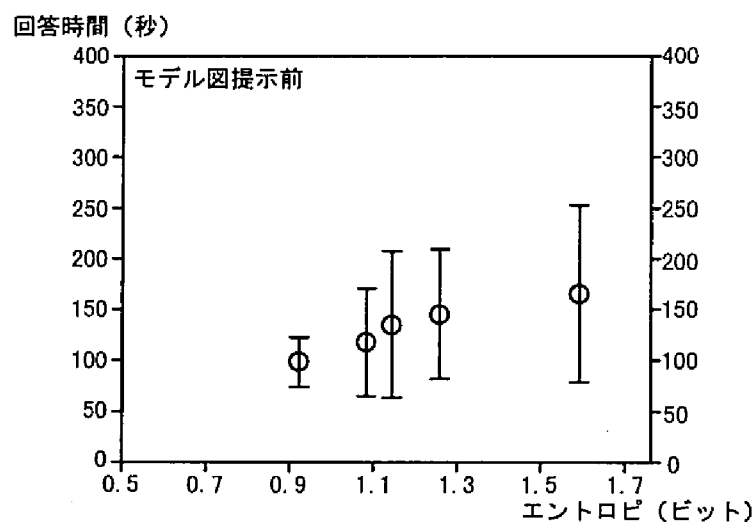


図 5-19 実験1における問題のエントロピと回答時間の関係(モデル図提示前と提示後)

また、問題 14 以降の状態遷移モデル図の提示前と提示後でのエントロピと回答時間の関係を図 5-19 に示す。この図からもわかるように状態遷移図の提示後は提示前に比べ、平均回答時間もその標準偏差も小さくなっている。これは提示後、被験者にこの状態遷移図の形で問題のメンタルモデルが定着し、学習が安定して行われたことを示す。

前述のように実験 1 の課題は合計 9 つの規則を記憶する問題に帰着するが、被験者はモデルに規則性を見出し記憶する量を減らして学習している。即ち、状態に着目しそれぞれの状態から各入力キーによりどの状態に遷移するかを記憶するのではなく、特定の入力キーに対する状態遷移の規則を見つけだしその規則を記憶する方策である。ここでは、前者の方策を「状態依存型記憶」、後者の方策を「入力依存型記憶」と呼ぶことにする。状態依存型の方策では、状態遷移モデルの難しさは前述のごとくエントロピに関係するが、入力依存型の方策の場合はモデル中のパタンの存在が問題の難しさに関係していると思われる。なお、いずれの方策を用いるかは個人差や問題により差があり、両方を組合せる場合もみられた。

本研究で用いた状態遷移モデルは見方を変えると、1 つの入力キーを押し続けることにより変化する状態の遷移からみて図 5-20 に示すような各種のパタンの存在が考えられる。そこで、状態遷移モデル中のこれらのパタンの存在が、回答時間にどのように影響したかについて考察する。

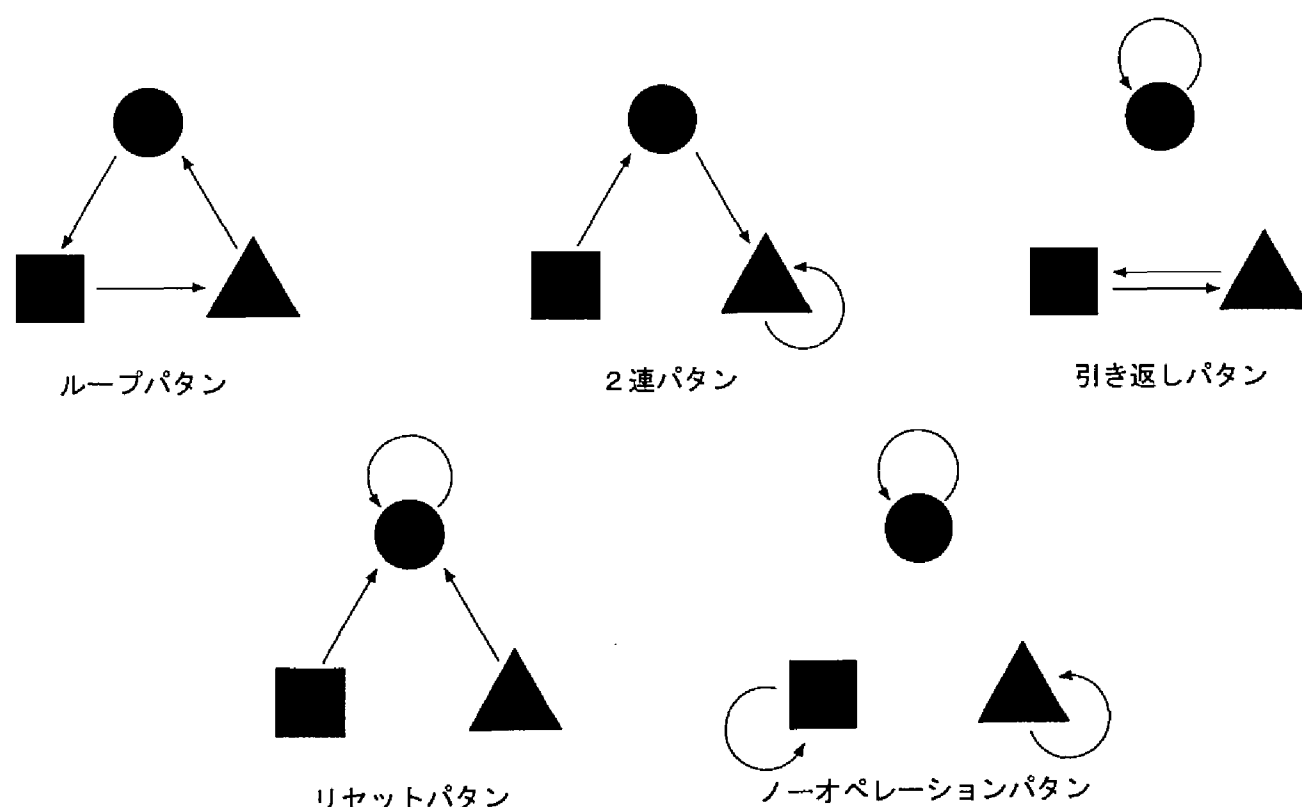


図 5-20 状態遷移モデルに含まれる各種のパタン

図 5-21 にノーオペレーション、ループ、リセット、二連、引き返しの各パタンについて、状態遷移モデル中に含まれるパタン数と回答時間との関係を示す。但し、被験者は前述と同じ 5 名である。グラフの横軸はモデル中に含まれるパタン数、縦軸は回答時間であり、図中の○印は回答時間の平均値、縦棒は標準偏差を表す。

ノーオペレーションパタンでは、パタン数が多いほど回答時間が短くなる傾向が顕著にみられる。ま

た、ループパタンではノーオペレーションほど顕著ではないが同様の傾向がみられる。一方、リセットパタンには、このような傾向がみられない。逆に、二連パタンや引き返しパタンは、これが多いほど回答時間が長くなる傾向がみられる。以上のことはパタンの種類が問題の難易度に影響を与えているものと解釈できる。ノーオペレーションパタンでは、これが多いほど問題が簡単に思われ、一方、リセットパタンはそれほど効果がない。二連パタンや引き返しパタンは逆に、これが増えるとパタン化して覚えにくいようである。また、入力依存型の方策をとる被験者では試行中に顕著なパタンをみつけると、実際はすべての状態遷移を把握したわけではないのに問題を解決したという確信(未熟な確信)が高まりエラーを惹起する傾向がみられた。

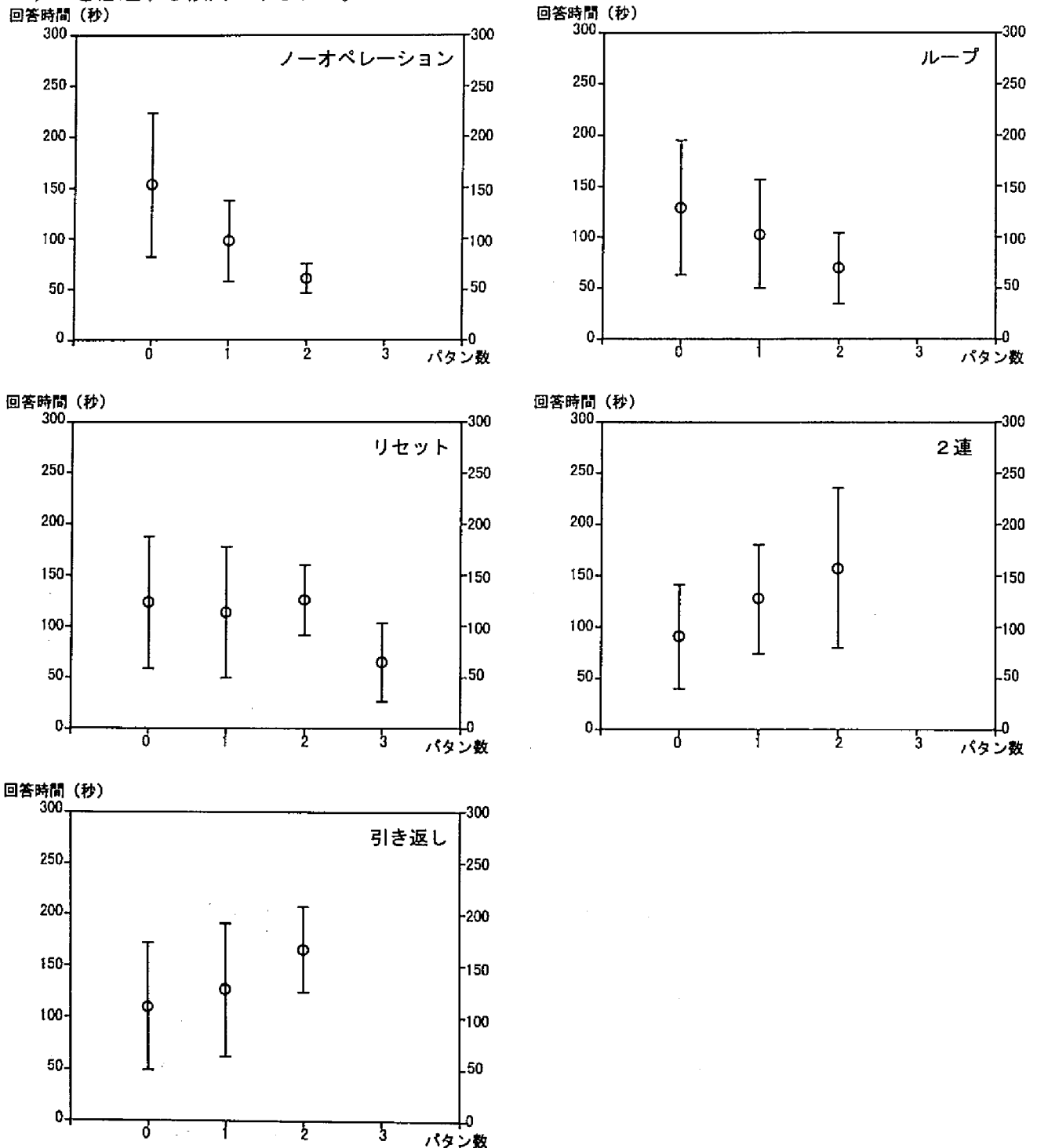


図 5-21 モデルに含まれるパタン数と回答時間の関係

5.3.1.2 実験2における問題の難易度

判別課題は、構造が異なる3つの状態遷移モデルであるサンプルから正しいモデルを判別する課題であるので、各サンプルが似ていれば似ているほど判別するのが困難ではないかと考えられる。そこで、実験2での各判別課題の3つのサンプル中の1対のサンプル間について「類似度」を定義し、さらにこれを用いていくつかの「難易度の指標」を定義し、これらの客観指標で実験結果を説明できるかどうかを試みた。ここではいくつかの指標をとって被験者の回答に要した遷移数（回答ステップ数）との関連性を調べたが、比較的説明がつけられる事例を中心に述べる。

(1)類似度

本研究で用いた3つの状態遷移モデルのサンプル図には、遷移を表す矢印に入力キーの番号が記されていない。そのため、本研究における2つのサンプル間の類似度をモデルの構造に関する図5-22のような状態遷移回数表を用いて定義する。

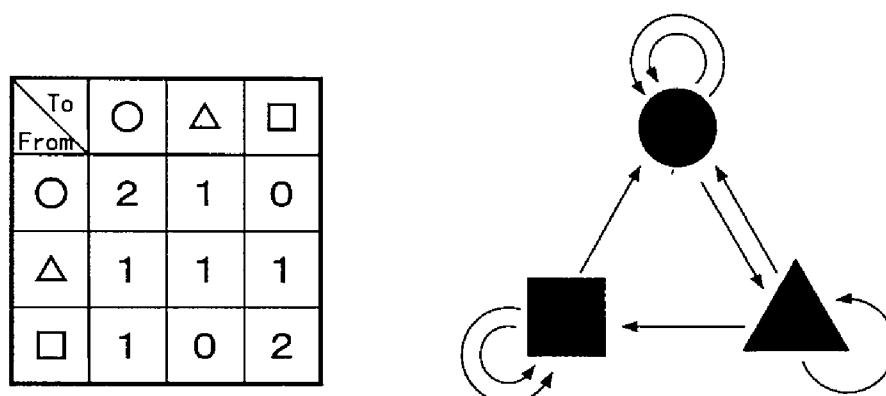


図5-22 状態遷移回数表とそのモデルの構造

左図の状態遷移回数表は、右図の状態遷移モデルの構造を表したものである。例えば、遷移元が○である第1行目についてみると、○から○への遷移が2つに、○から△への遷移が1つあることがわかる。ここで、2つのサンプルであるモデルの状態遷移回数表の各項目について

▪ (2,2)、(1,1)、(0,0)	1 点
▪ (2,1)、(1,2)	0.5 点
▪ (1,0)、(0,1)、(2,0)、(0,2)	0 点

とし、これらを9つの項目について加えたものを「類似度」として定義する。この類似度を用いて、実験2の各問題の「難易度の指標」を次のように考えた。

(2)難易度の指標

正解と他の2つのサンプルとの類似度の和をとって、難易度の指標 B_2 とする。これは、正解との類似度をとることにより正解がどれだけ判別しにくいかを考慮している。

図5-23に3人の被験者の回答までに要した遷移数と難易度の指標 B_2 との関係について示す。但し、各被験者とも問題に不慣れな初期の問題（1から13まで）と入力時間間隔の短い1秒のものは除いて

いる。この図からもわかるように全体的に右上がりの傾向がみられ、難易度の指標が大きいほど回答に要した遷移数も多いと思われる。しかし、難易度の指標が 15 あたりで回答に要した遷移数が少なくなるのは、類似度が高いために、逆にその違いが目につきやすくなるためではないかと考えられる。また、すべての問題で回答に要した遷移数が極端に少ないものがあるのは、問題開始から早い時期にランダムに起こる入力の中で解答の手懸かりとなる遷移が起こったためであると考えられる。

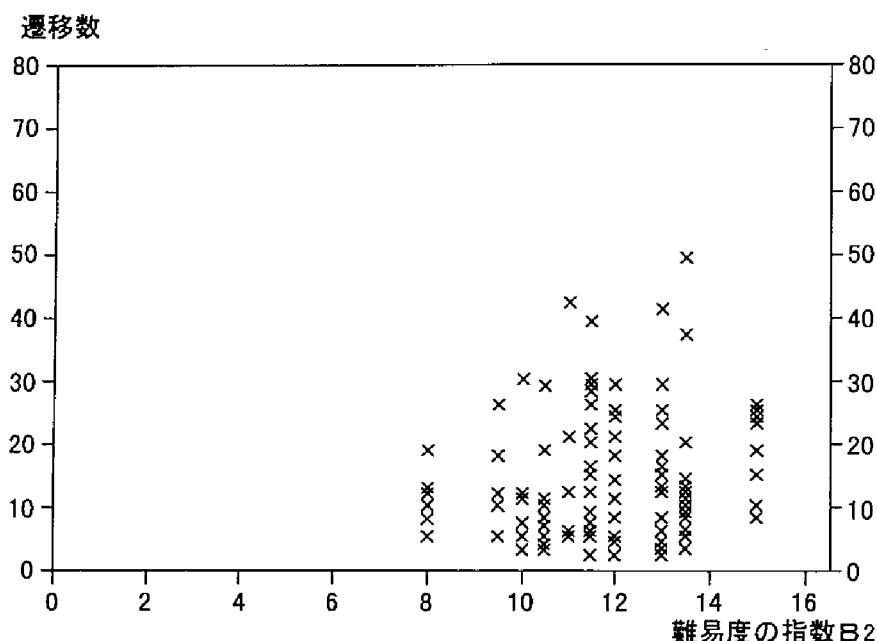


図 5-23 難易度の指標 B_2 と回答に要した遷移数の関係

5.3.1.3 実験 3 における問題の難易度

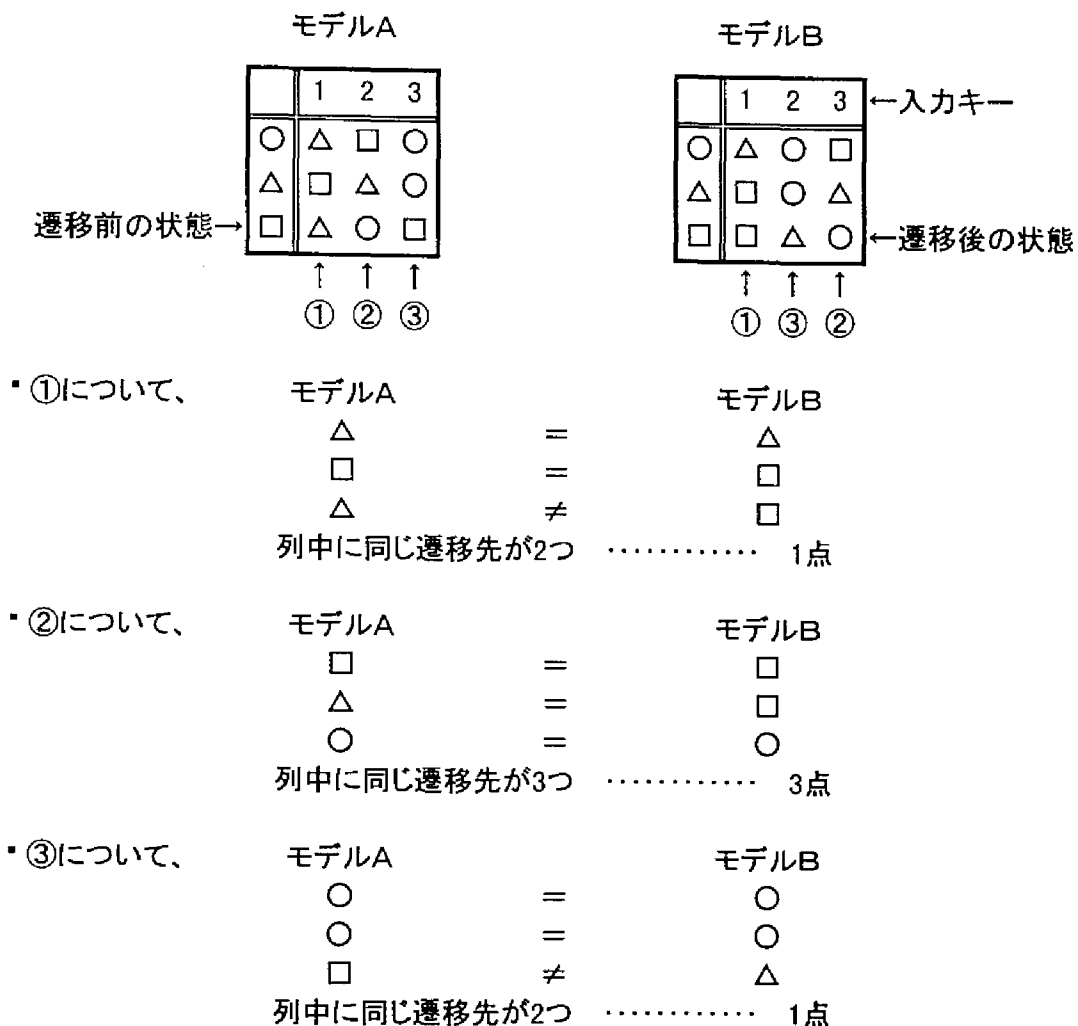
実験 2 の場合と同様に実験 3 の判別課題においても 2 つのモデル間の類似度およびそれを用いた問題の難易度の指標を定義した。実験 3 の問題では、3 つのサンプルは構造が同じであるが入力キーが違っている。そのため、実験 2 の場合とは別の方法で類似度および難易度の指標を定義し、回答に要した遷移数との関係を調べる。

(1) 類似度

サンプルに用いる状態遷移モデルは、図 5-2 のように状態遷移表で表すことができる。実験 3 では、サンプル図が入力キー番号に替わって P、E、L の文字になっているので状態遷移表の各列の順番は意味がない。それ故、類似度を考える際には、一方の列を他方に一番似ているように入れ替えてから比較する。そのとき、

- 対応する列中に同じ遷移先が 3 つ 3 点
- 対応する列中に同じ遷移先が 2 つ 1 点
- 対応する列中に同じ遷移先が 1 つ 0 点
- 対応する列中に同じ遷移先がない 0 点

として各列の点数の和を類似度とする。モデル間の類似度の算出例を図 5-24 に示す。



類似度は $1+3+1 = 5$ 点 となる。

図 5-24 モデル間の類似度の算出

(2) 難易度の指標

上述のようにして得られる類似度を用いて難易度の指標 D_2 を定義した。この難易度の指標 D_2 は、問題の 3 つのサンプル間の類似度の和とした。

得られた難易度の指標 D_2 と、4 人の被験者の回答に要した遷移数との関係を図 5-25 に示す。但し、問題に慣れていない 1 問目、2 問目は除いている。この図からもわかるように全体的に右上がりの傾向がみられる。即ち、難易度の指標 D_2 が大きいほど回答に要した遷移数は多くなると考えられる。しかし、この指標と回答に要した遷移数との関係も実験 2 の場合と同様に、指標 15 のときに回答に要した遷移数は少なくなっている。この場合も、類似度が高いため逆に違う点に気が付き易かったためと考えられる。この問題のサンプルを図 5-26 に示す。但し、図中の矢印に付した 1、2、3 は E、P、L のいずれかに対応する。右端のサンプル 3 が正解であるが、他のサンプルと違う点は□から○への遷移に対応する入力キーだけである。被験者は 3 つのサンプルを比較して、早い時期にこのことに気が付き□から○への遷移に注目していたため回答に要した遷移数が少なくなっている。また、実験 3 の場合でもランダ

ムに入力されるキーに対応する遷移で手懸かりとなるものが早い時期に現われると回答に要した遷移数が少なくなる。

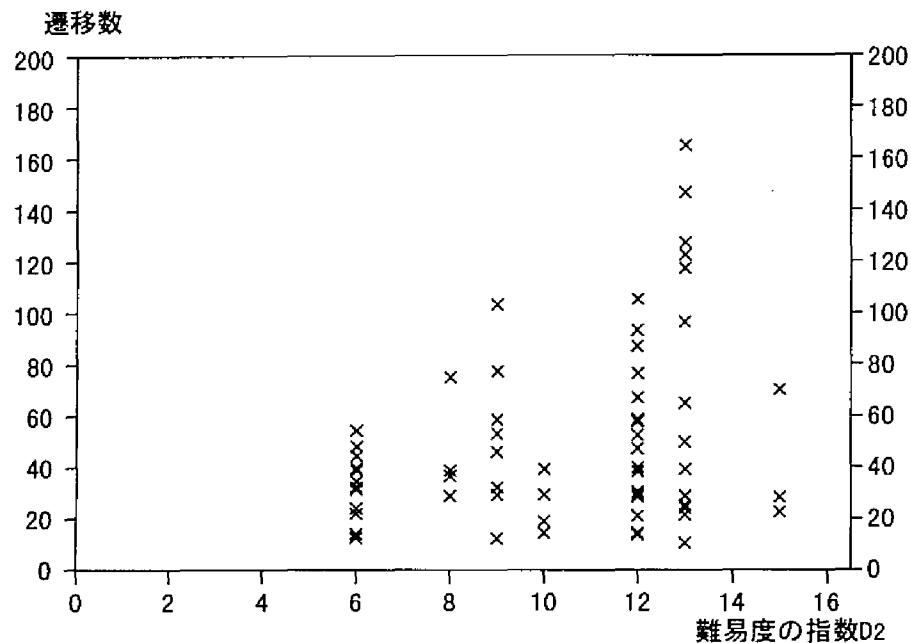


図 5-25 難易度の指標 D_2 と回答に要した遷移数の関係

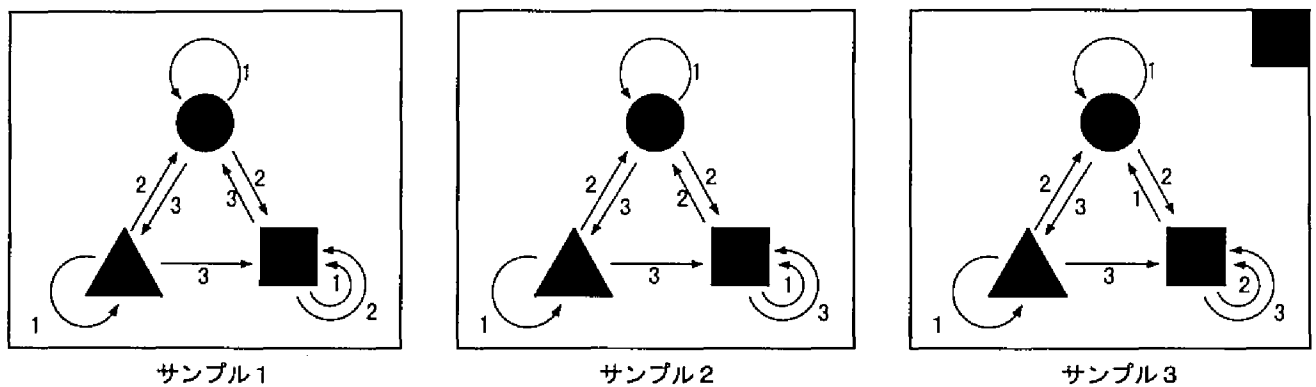


図 5-26 実験3における類似度が高いサンプル

実験3における問題に対する難易度の指標は、この D_2 の他に4通りほど考えたが、他の指標については回答に要した遷移数との間にあまり関連性は見出せなかった。

以上のように実験3の判別課題においても判別の対象となるサンプルの類似度とその問題の難易度にある程度関連があることがわかった。しかし判別課題では、学習課題で難易度について考察したエントロピや各種のパタンのような顕著な傾向を表すものが得られなかった。これは、一定の時間間隔で遷移がランダムに起こりその遷移の出現の時期や順序が問題によって異なるため、早い時期に判別の手懸かりとなる遷移が出現した場合と遅い時期に出現した場合とでは、回答に要した遷移数が大きく違ってくるのが原因となっている。次項では、この判別の手懸かりとなる遷移について考察する。

5.3.2 判別課題における手懸かりとなる遷移

学習課題における被験者のとった方策については5.3.1.1に述べたが、判別課題の実験では実験中の観察から、被験者が正解を判別するのに3つのサンプルのうちから正解でないサンプルを1つずつ見つけていく「消去法」を方策として用いていることがわかった。即ち、被験者は画面に次々に提示される遷移を見て、判別の手懸かりとなる遷移が現われると正解でないサンプルを消去していく。実験2の判別課題の場合、3つのサンプルで構造が異なるので、画面に提示された状態の遷移が、3つのうち1つのサンプルでは起こりえない（以下「判別の手懸かりとなる遷移」と呼ぶ）ことに気がつく、被験者はそのサンプルを正解でないと判断して消去するのである。このような判別の手懸かりとなる状態遷移には、いくつかの場合が考えられるが被験者の行動を観察した結果、次の2種類の状態遷移を手懸かりとして用いていることがわかった。

まず、第1の判別の手懸かりは、ある状態から別の状態へ遷移した時、このような遷移がどれかのサンプル図中にその遷移を示す矢印がなかったときそのサンプルを消去できるというものである。この場合の実例（実験2、問題32）を図5-27に示す。この問題の正解はサンプル3であるが、例えば状態が○から△に変化したとすると、サンプル1のみに○から△に変化する矢印がないので、これよりサンプル1は正解でないと消去できる。また同様に、状態図が○から□に変化したとすると、サンプル2が消去できることがわかる。このような方法は、被験者にとって最も見つけやすいものと思われる。

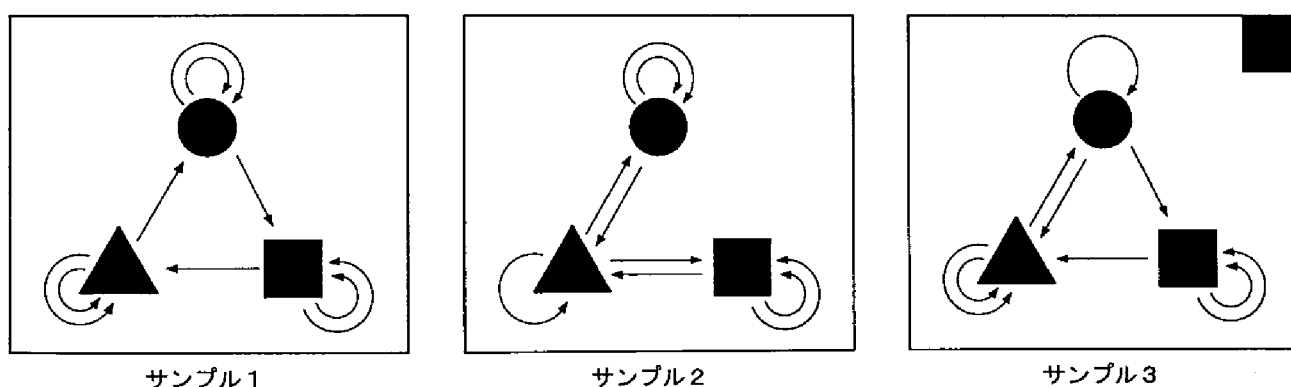


図5-27 実験2、問題32のサンプル

次いで、もう一方の判別の手懸かりとなる遷移の第2の種類は、遷移先が同じ状態の入力キーが2つあることで正解でないサンプルを消去するものである。図5-27では、入力キーで△から△、ついで別の入力キーで再び△に遷移したとすると、サンプル2が正解でないと判断できる。即ち、サンプル1、サンプル3の状態遷移図では△に戻る遷移が2通りあるのに対して、サンプル2では△に戻る遷移は1つしかない。このように、実験2における被験者の問題解決の方策は、まず入力キーと状態変化の系列を観察し、画面に提示されている状態遷移モデルを完全に解明してから、それが画面下に提示されている3つのサンプルのいずれかということを判別するといった時間もある程度かかり、記憶負荷も多い方法をとるよりは、むしろ①画面に刻々提示される1回毎の遷移情報が3つのサンプルのうち1つを消去するのに使えるか、②異なる2つのキー入力で状態が遷移しないことでサンプルの消去ができるか、といった状況依存型の記憶負荷の少ない方法を問題解決方策として用いることが観察の結果、判明した。

そこで、被験者はこの2つの方策を用いると考え、問題を解決するのに最短な時間に対してどの程度

効率的な行動をしていたのかという点をアイマークレコーダより得られた視点位置を中心に客観的に分析、検討することにした。

以上に述べた分析を容易にするため、まず、これら2種の判別の手懸かりとなる遷移を考慮して、実験中にいつ手懸かりとなる遷移が起こったかを調べるため実験の各問題に対して図5-28のようなタイミングチャートを作成した。

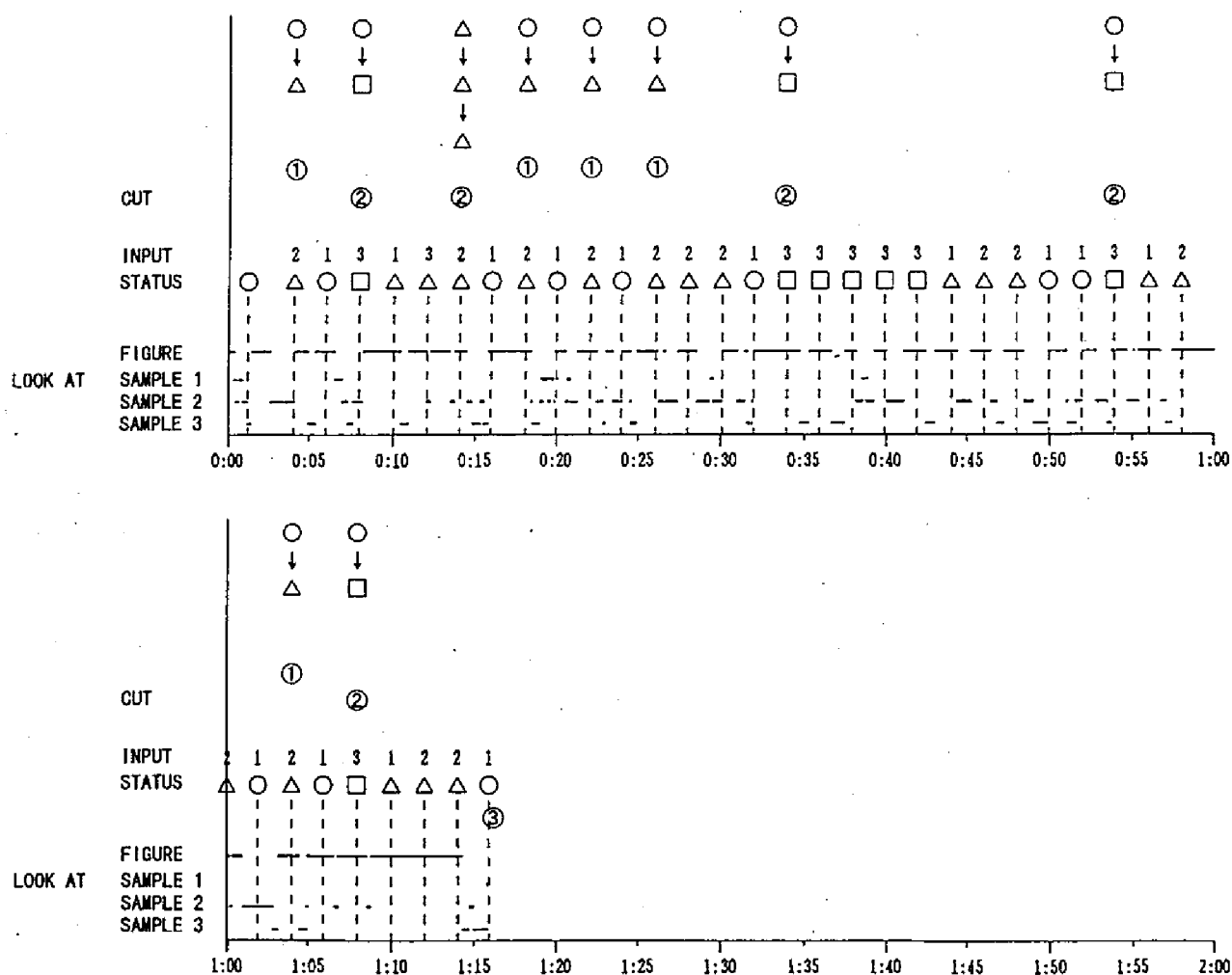


図5-28 判別の手懸かりとなる遷移と視点の位置を表すタイミングチャート

このチャートには、視野像上のアイマーク位置データを処理し、各問題中に被験者がどこを見ていたかを併せて示している。図は二段に分かれており各段とも、手懸かりとなる遷移、そのときに消去できるサンプル番号、入力キー、入力キーにより変化した状態図、注視点となっている。注視点は、(a)状態図および入力キー、(b)サンプル図1、(c)サンプル図2、(d)サンプル図3のいずれを見ていたかにより4つに分けて示している。注視点を以上の(a)、(b)、(c)、(d)に判別するのに用いた方法は、アイマークの水平位置、垂直位置から次のように求めた。判別課題の問題提示画面は図5-8に示すように、上部に状態図および入力キー、下部にサンプル図がある。問題提示画面の前に座った被験者が上下に頭を動かし、それによって視野像上のアイマーク位置が動くこともあるので、アイマーク垂直位置の前後7秒間の平均をとり、その平均よりアイマークが上側にあれば(a)状態図および入力キーを見ているもの

と判断し、アイマークが下側にあった場合は、そのときのアイマークの水平位置から求めている。この実験の場合、被験者が左右に頭を動かすことはほとんどないので、問題中のアイマーク水平位置の平均と分散をとり、アイマークがその分散より右側にあれば(b)サンプル 1 を、アイマークが分散の中にあれば(c)サンプル 2 を、そして左側にあれば(d)サンプル 3 を見ているものとしている。一方、図 5-28 中の注視点の変化の下部には時間軸が示されており問題開始からの経過時間を 5 秒ごとに示し、各問題の最後には被験者が正解と判断したサンプル番号を示している。図 5-28 は前述の問題 32 (入力時間間隔 2 秒) をある被験者が行ったときの記録である。この問題では、実験開始後、約 4 秒の 1 つ目の遷移 (○→△) の提示で、サンプル 1 を消去でき、ついで、約 7 秒の 2 つ目の手懸かりとなる遷移 (○→□) でサンプル 2 が正解ではないと判断できるので、この時点で被験者にはサンプル 3 が正解であると判別するのに十分な状態遷移が起こっている。また、問題開始から 12 秒、14 秒で起こった遷移 (△→△→△) はそれぞれの遷移を起こした入力キーが違うので判別の手懸かりとなりうるが、46 秒、48 秒で起こった遷移 (△→△→△) は同じ入力キーであるので判別の手懸かりとはなり得ない。この問題では、約 7 秒までの 2 つ目の手懸かりとなる遷移で正解を判別できるにもかかわらず、約 1 分 10 秒までの 9 個の手懸かりとなる遷移の後で正解を見つけている。このような効率の悪さの理由としては、(1) その遷移が判別の手懸かりであることに気付いていない、(2) 状態図の変化を見ていない、の 2 つが考えられる。

そこでこれらの点を考慮して、実験 2 の各問題中にどれだけ判別の手懸かりとなる状態図の変化が出現したか、それらのうち正解を判別できうる最小数がある被験者の実験記録から調べた。被験者が判別の手懸かりとなる状態図の変化を見ていないときのことを考慮して、被験者が見ていたと考えられる状態図の変化についても調べた。但し、ここでは状態図の変化の前後で被験者がそれらの状態図を 1/3 秒以上連続して注視していたときを、その状態図の変化を見ているものと仮定した。また同時に、各問題の回答時間、正解を判別できうる遷移が出現した時間、見ていた状態図の変化のうちで正解を判別できうる時間をあわせて表 5-2～表 5-4 に入力時間間隔別に示す。但し、これらの表には判別の手懸かりとなる遷移が出現していないのに回答したものや誤答は除いている。

表中の全ての手懸かりとなる遷移の最小数というのは、被験者が全ての遷移を見ていたと仮定して、正解を判別するのに最小限必要な手懸かりとなる遷移数を表している。また、見ていた遷移の最小数というのは、被験者が見ていたと考えられる遷移の中で、正解を判別するのに最小限必要な遷移数を表す。これが 0 になっているものは、前述の仮定で手懸かりとなる遷移を見ていないと考えられるにもかかわらず回答に至ったものである。表では、全ての手懸かりとなる遷移数のうち被験者が見ていた遷移数を除いたものが手懸かりとなる遷移を見逃したものと考えられ、入力時間間隔が 1 秒の時は 2 秒、3 秒に比べ判別の手懸かりとなる遷移の中で被験者が見逃したものは非常に多く、入力時間間隔 2 秒、3 秒の見逃し平均率がそれぞれ 19.0%、12.9% に対し、47.5% にものぼっている。これは、状態図の変化が非常に速く起こるので被験者がサンプル図を見比べている間に次々と状態が変化していくためと考えられる。なお、入力時間間隔が 2 秒と 3 秒では、1 秒のときほど差はないが、3 秒のときの方が見逃し率は若干改善されている。

表 5-2 判別の手懸かりとなる遷移の出現（実験2、入力間隔 1 秒）

問題 番号	全ての手懸かり となる遷移		被験者が見ていた 遷移		全ての手懸かり となる遷移での 最短時間(秒)	被験者が見てい た遷移での最短 時間(秒)	回答時間 (秒)
	最小数	全遷移数	最小数	全遷移数			
1	1	60	1	33	5	5	279
4	3	14	3	5	12	30	69
7	3	5	2	3	15	15	24
10	17	53	10	29	40	40	123
13	13	19	3	8	48	48	73
16	1	11	1	10	5	5	45
19	2	6	2	4	5	5	16
22	3	3	3	3	7	7	12
25	/	/	/	/	/	/	/
28	/	/	/	/	/	/	/
31	1	12	1	5	3	3	39
34	2	5	2	2	18	18	23
37	2	22	2	12	5	5	39
40	3	5	2	2	9	9	17
43	5	11	0	3	13	0	29
46	/	/	/	/	/	/	/
49	2	10	0	7	5	0	32
52	3	14	2	11	9	9	72
55	3	11	2	4	9	9	37
58	1	1	0	0	10	0	14
61	3	5	0	2	10	0	21
64	2	13	3	4	26	37	63
67	2	17	2	9	8	8	61

表 5-3 判別の手懸かりとなる遷移の出現（実験2、入力間隔 2 秒）

問題 番号	全ての手懸かり となる遷移		被験者が見ていた 遷移		全ての手懸かり となる遷移での 最短時間(秒)	被験者が見てい た遷移での最短 時間(秒)	回答時間 (秒)
	最小数	全遷移数	最小数	全遷移数			
2	6	8	4	4	99	99	111
5	13	16	11	12	90	90	97
8	1	3	1	3	14	14	42
11	/	/	/	/	/	/	/
14	5	11	7	10	18	30	40
17	3	7	3	7	9	9	26
20	2	7	2	7	8	8	40
23	/	/	/	/	/	/	/
26	5	6	5	5	38	38	42
29	4	4	4	4	26	26	35
32	2	10	2	10	7	7	75
35	2	2	2	2	28	28	30
38	2	9	2	8	8	8	32
41	2	6	2	5	15	15	44
44	2	4	2	4	30	30	42
47	2	2	2	2	19	19	34
50	2	10	1	6	20	20	99
53	2	10	6	8	10	42	62
56	9	10	9	9	58	58	60
59	3	5	0	1	28	0	54
62	1	4	1	3	6	6	28
65	1	2	1	1	13	17	22
68	1	1	0	0	10	0	12

表 5-4 判別の手懸かりとなる遷移の出現（実験2、入力間隔 3 秒）

問題 番号	全ての手懸かり となる遷移		被験者が見ていた 遷移		全ての手懸かり となる遷移での 最短時間(秒)	被験者が見てい た遷移での最短 時間(秒)	回答時間 (秒)
	最小数	全遷移数	最小数	全遷移数			
3	16	16	16	16	127	127	139
6	2	4	2	4	16	16	68
9	4	6	3	4	49	49	65
12	2	6	2	6	10	10	55
15	/	/	/	/	/	/	/
18	3	5	3	4	31	31	55
21	3	5	3	4	37	37	61
24	2	3	2	2	13	13	30
27	3	5	3	3	28	28	35
30	3	3	3	3	19	19	23
33	/	/	/	/	/	/	/
36	/	/	/	/	/	/	/
39	1	2	0	0	43	0	46
42	1	2	1	2	4	4	17
45	2	21	2	20	13	13	128
48	2	5	2	5	25	25	76
51	2	7	2	6	49	49	91
54	3	4	3	4	31	31	37
57	2	8	2	6	28	28	88
60	2	4	2	4	16	16	25
63	2	9	2	8	10	10	56
66	2	9	5	7	13	58	88
69	/	/	/	/	/	/	/

一方、被験者が見ていた状態図の変化のうちで、判別の手懸かりとなる遷移にどれだけ気付いていたかについて考察する。図 5-29～図 5-31 に前述の被験者について、見ていた状態図の変化のうち回答までに出現した手懸かりとなる遷移数に対する正解を判別しうるまでに出現した遷移数の比率を、入力時間間隔別に示した。これらのグラフでは横軸に問題番号、縦軸に比率をとっている。この比率が 100% のものは、被験者が見ていた状態図の変化の中で、判別の手懸かりとなるものに気付き最小の遷移数で回答に至ったと考えられる。

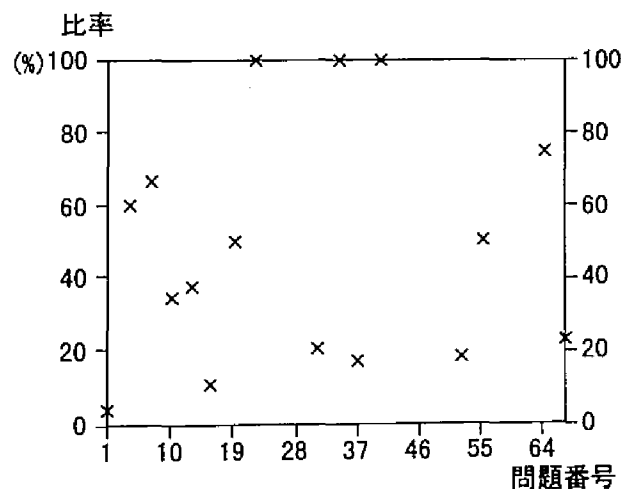


図 5-29 回答までに出現した手懸かりとなる遷移数に対する正解を判別するまでに出現した遷移数の比率（実験2、入力時間間隔 1 秒）

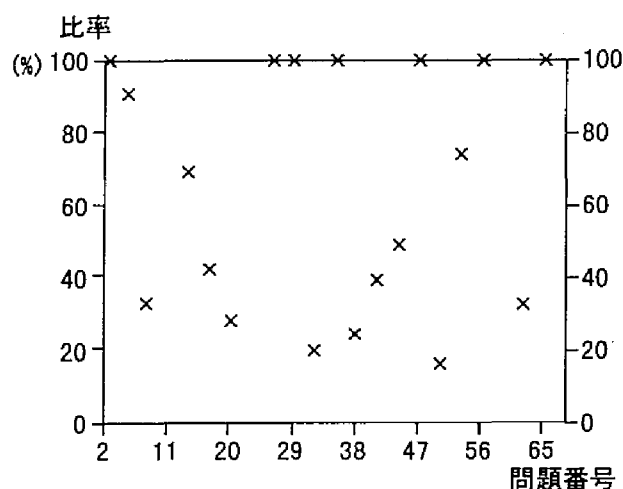


図 5-30 回答までに出現した手懸かりとなる遷移数に対する正解を判別するまでに出現した遷移数の比率
(実験2、入力時間間隔 2 秒)

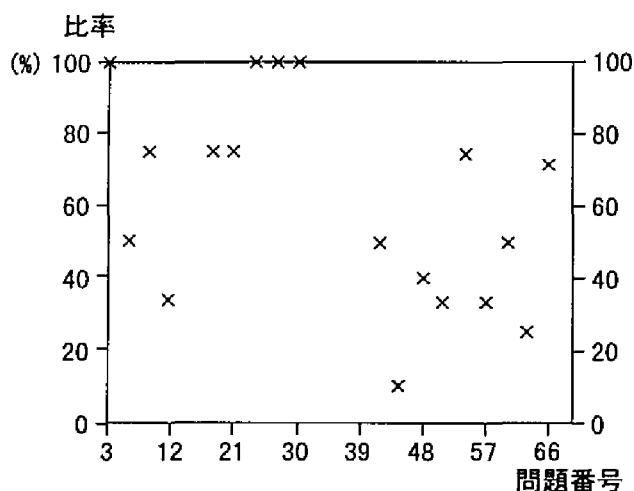


図 5-31 回答までに出現した手懸かりとなる遷移数に対する正解を判別するまでに出現した遷移数の比率
(実験2、入力時間間隔 3 秒)

この図からもわかるように、入力時間間隔が 1 秒のときは 2 秒、3 秒のときに比べ、全体的に比率が低い。これを入力時間間隔別に各問題の平均値でみると、2 秒、3 秒のときはそれぞれ 64.4%、60.9% に対し、1 秒のときは 47.7% と 10% 以上も低い。即ち、入力時間間隔が 1 秒の問題は、被験者が状態図の変化を見ているにもかかわらずそれが判別の手懸かりとなることに気付いていない。これは、入力時間間隔が 1 秒では正解を判別するのに十分な思考時間が得られないためと思われる。なお、この比率の平均値では 2 秒、3 秒のときには顕著な差はみられない。

以上の実験の結果をまとめると、①状態変化の提示時間が被験者の効率に影響を与える。提示時間が短い (1 秒) と見逃し率も手懸かり検出率も悪い。②提示時間が長ければ (2、3 秒)、見逃し率は低くなるが、手懸かり検出率の方は 60% 程度ということになる。なお問題が進むと、判別方法の習熟や疲労によりこの比率が変化すると考えられるが、今回の実験ではそのような傾向はみられなかった。

5.3.3 メンタルイメージ

実験 1 におけるメンタルイメージ (メンタルモデル) の認知行動に与える効果については、5.3.1.1

で述べたが、本節では実験1の前半の各問題後に被験者が描いた回答から被験者のメンタルイメージの変化について、一例を挙げて考察する。その例として、問題2および問題11終了後、ある被験者が描いた回答図を図5-32、図5-33に示す。

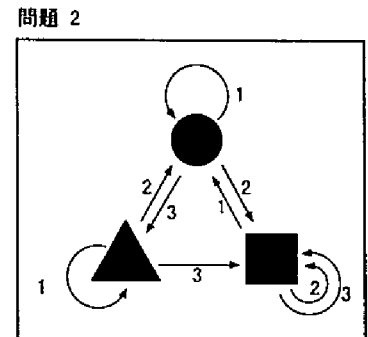
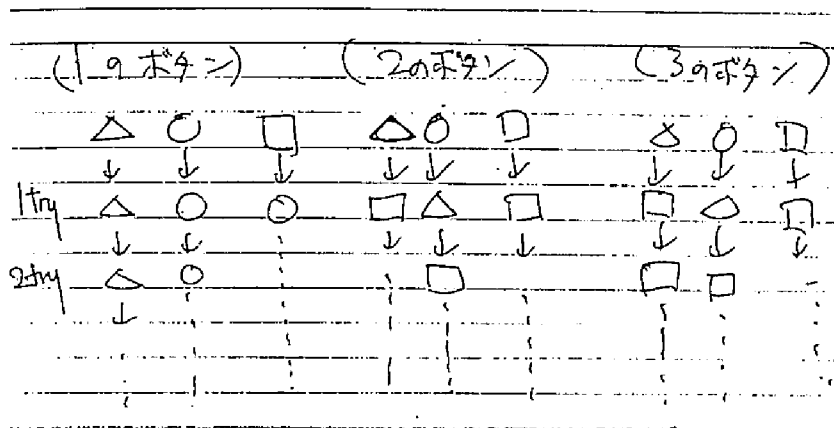


図5-32 実験1、問題2の終了時に被験者が描いた回答図と正解の状態遷移図
(但し、入力キー2に対する回答は被験者が間違えている)

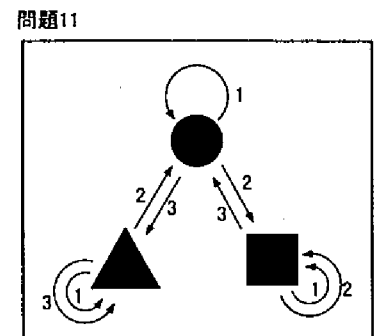
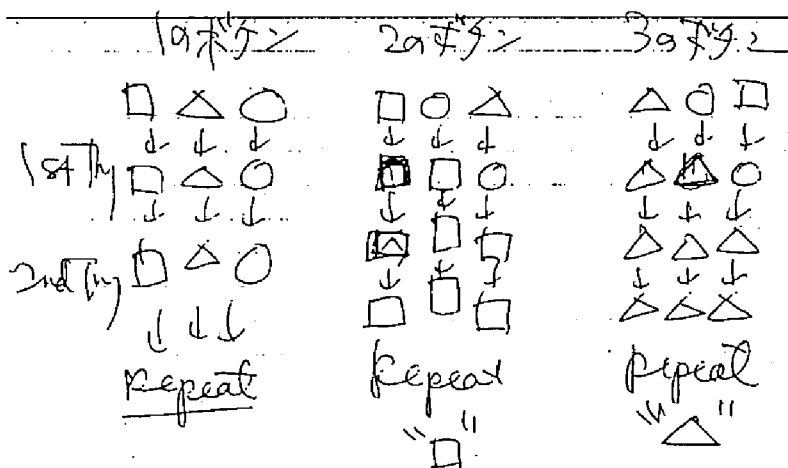


図5-33 実験1、問題11の終了時に被験者が描いた回答図と正解の状態遷移図

問題2では、被験者にはまだ各種のパタンのイメージが定着していないため、すべての入力キーに対するすべての遷移を記憶しているが、問題11では二連パタンがメンタルイメージとして定着しており、それを認識して記憶量を減らしている。ここでは、問題2と問題11にそれぞれ $\bigcirc \rightarrow \triangle \rightarrow \square \rightarrow \square \rightarrow \square \dots$ および、 $\square \rightarrow \bigcirc \rightarrow \triangle \rightarrow \triangle \rightarrow \triangle \dots$ という二連パタンが入力キー3で起こるが、問題2(図5-6)では、すべての入力キーに対して \triangle 、 \bigcirc 、 \square の順で遷移を描いているのに対して、問題11(図5-33)では、二連パタンのメンタルイメージを用いて記憶量を減らしているために、各入力キーで記憶しやすい遷移の順番が異なり、入力キー3については二連パタンを記憶しやすい順序(\triangle 、 \bigcirc 、 \square)で描いている。また、この被験者の場合、各入力キーに対してそのときの状態がどの状態に遷移するのかということに

注目して回答図を描いているが、これは入力依存型の記憶方策を用いているためと考えられる。このように、被験者が回答後に描いた図から、メンタルイメージや方策を推量することができる。

5.3.4 ストレスを与える問題

5.2.1項で述べたように各実験には被験者にストレスを与えるような問題を用意した。本項ではこのようなストレスを与える問題が、回答までに要した時間や遷移数にどのような影響を及ぼしたかについて考察し、顕著な反応がみられた問題について観察結果を述べる。表 5-5 に 3 人の被験者について行ったストレス問題の実験結果を示す。実験 1 については問題 23、問題 24 を、実験 2 については入力時間間隔が 1 秒の問題を除いて問題 23、問題 24 を、そして実験 3 については問題 20 を表に挙げた。但し、実験 1 では回答までに要した時間を、そして実験 2、実験 3 では回答までに要した遷移数を実験結果としている。なお、ストレスを与える問題の具体的な内容は 5.2.1 項で述べた。

表 5-5 ストレスを与える問題の実験結果

ストレス問題	被験者A		被験者B		被験者C		課題の概略
	回答	平均	回答	平均	回答	平均	
実験1 問題23	217秒	78.2秒	149秒	49.9秒	150秒	67.9秒	図に文字が重畳
	問題24	50秒	78.2秒	42秒	49.9秒	185秒	67.9秒
実験2 問題23	23回	24.4回	41回	17.9回	18回	16.7回	正解が2つある
	問題69	12回	18.7回	15回	10.9回	6回	13.0回
実験3 問題30	74回	49.7回	38回	34.6回	36回	67.8回	構造が異なる

但し、回答／平均は、

実験1: 回答までに要した時間／メンタルモデル提示後の回答時間の平均

実験2: 回答までに要した遷移数／平均遷移数

実験3: 回答までに要した遷移数／平均遷移数

を表す。

まず、実験 1 の問題 23 では、3 人の被験者とも明らかに回答までに時間がかかっており、平均回答時間の倍以上にもなっている。これは、問題 23 になると突然画面上の状態図に文字が重畳して表示されたために、被験者が新規な状況に戸惑いをおぼえたと考えられる。その後の被験者の対応は、被験者の発話では、それぞれ「あ！何ですかこれは？」、「何だこれは？」、「あれ？こんな文字さっきからでてましたっけ？」となっており、また皮膚電位に顕著な変化があらわれた。そして、入力キーを 1、2 回押して状態図と無関係に文字が重畳されているのを見たときに再び皮膚電位が大きく変化しており、2 回にわたって「これまでとは異なった状況変化」に戸惑いをおぼえている様子がうかがえる。その後、横にいる実験施行者に、どのように問題を進めていくかを尋ねており、文字が無関係であることを教えると以前と同じように学習を始めている。この一連の行動はすべての被験者にみられた。なお一部の被験者は、状態図とその中の文字が一致しない（例えば、図は○で中の文字が「三角」）ため若干混乱していることが発話からもうかがえたが、文字が無関係なことを知るとこれを無視して図形だけを選択的に見ることにすぐ慣れたようである。その後の問題ではどの被験者も、図形に文字が重畳していても戸惑うこともなく適応していた。

一方、問題 24 は被験者 A、B にほとんど影響がないが、被験者 C では回答時間が平均の 3 倍近くもかかっている。これは実験後の発話報告によると、被験者 A、B の場合どのように入力キーを押しても現われない状態があることを早い時期に気付いたが、被験者 C は入力キーを押す順序により 3 つの状態がすべて現われるはずだとなおも信じていたために回答時間がかかったようである。このように、問題 24 ではこの被験者にみられた思考形態（古いメンタルイメージから脱却できない）の特性を見つけることができた。

次に実験 2 では、問題 23、問題 69 とともに回答までに要した遷移数が平均に比べて多くなるような傾向はみられない。これは、判別課題において正解が 2 つあったとしても被験者には両方が正解であることが簡単にわかり、どちらを正解とするかという判断の過程にのみストレスを与えるため、正解を判別する際にはほとんど影響がないと考えられる。また、実験 3 でも回答に要した遷移数が多くなるような傾向はみられない。この問題は、図 4-22 に示すようにサンプル 3 だけモデルの構造が変えてあるが、それまでに用いていた方策によって正解を判別できるために、被験者にストレスがかかることはないと考えられる。

このように、被験者にストレスを与えるような問題を各実験でいくつか用意したが、結局被験者の認知行動に共通して大きな影響を及ぼしたのは、初めて視覚情報に異常な状況を与えた実験 1 の問題 23 だけであった。生理データからみると、皮膚電位は予測しない事態の発生に対する被験者の情動的反応をよく反映することが観測された。なお与えられた問題にもよると思われるが、被験者は予想外の事態が発生してもその対処の仕方を判ってしまうと迅速に新しい状況に適応できることが観察された。

以上のように、本節では認知心理実験で得られた操作記録と発話記録の解析を行い、被験者に与えた認知タスクと認知行動特性の関連性を検討した。その結果から、認知タスクの種類、その提示方法、問題解決方策などが問題解決時の被験者のパフォーマンスに影響を与えることがわかった。これは、相互適応型インタフェース実現にあたって、操作記録や発話記録から人間の認知状態を把握する技術だけでなく、タスクの種類や提示方法が被験者の問題解決行動に与える影響を予測する手法の一つとして活用できると考えられる。

5.4 実験結果と考察 2（視覚系データと生理電気信号）

本節では、認知心理実験により得られたデータのうち、特に視覚系データおよび生理電気信号に注目して解析を進める。このような生体情報の収集、解析は、被験者の認知過程や情動変化等の内面状態を直接推定できる可能性があり、相互適応型インタフェースにおける人間情報行動計測および認知状態推定手法に重要な示唆を与えるものである。

以下、実験で得られた視覚系データの解析として、5.4.1 項で眼球のサッケード運動、5.4.2 項で注視、5.4.3 項で瞳孔反応、5.4.4 項で瞬目について解析手法とその結果を述べる。また、生理電気信号としては、実験中に被験者から得られたもののうち、皮膚電位反応と心拍率に着目し実験データの解析を行った。5.4.5 項で皮膚電位反応を、5.4.6 項で心拍率について解析結果を述べる。

5.4.1 サッケード運動

アイマークレコードより得られる視野像上でのアイマークの位置変化から、実験の各問題での視点の移動速度分布を求めた結果を図 5-34～図 5-38 に示す。図中、横軸は視点の移動速度（単位は deg/sec）

を表し、縦軸はその移動速度の各問題中での比率を表す。また、斜めの軸は右から左へ順に問題番号を表す。視点の移動速度が 100 deg/sec 以上の比率をグラフの右端に太い縦線で示し、その比率をグラフの右上に示す。また、Average とあるのは、視点の移動速度が 100deg/sec 以上の比率の平均値を表す。

図 5-34は、ある被験者の実験 1 での視点の移動速度分布を示し、図 5-35～図 5-37は同じ被験者の実験 2 での分布を入力時間間隔別（1、2、3 秒）に示したものである。また、図 5-38は実験 3 での分布である。視点の移動速度が 100deg/sec までは注視または円滑な追跡運動と考えられ、その比率は各実験で異なるがおよそ 90～98%程度となっている。逆に、100deg/sec 以上のものはサッケード運動と考えられ、その比率は 2～10%程度であった。実験 1 では問題が提示される画面上に状態図が表示されそのすぐ下に入力キーがあるので視点はほとんど動くことがないと考えられるのでサッケード運動の比率は、下方のサンプル図などを参照する実験 2 に比べ半分程度となっている。また、実験 2 の入力時間間隔の違いについては、1、2、3 秒とも顕著な差異はみられなかった。実験 3 は、実験 2 と同じような判別課題であるにもかかわらずサッケード運動の比率は低くなっている。実験 3 の場合、各サンプルは構造が同じで入力キーだけが異なるので、サンプルの構造自体が異なる実験 2 に比べサンプル間の違いが目につきにくく、サンプル図を見る時の注視の比率が高まりサッケード運動の比率が低くなるものと考えられる。一方、実験 2 における回答時間と視点の移動速度について考察する。表 5-6、表 5-7に回答時間の長くかかった問題と短かった問題について、サッケード運動の比率を示す。但し、問題に不慣れな 1～13 間は除いてある。

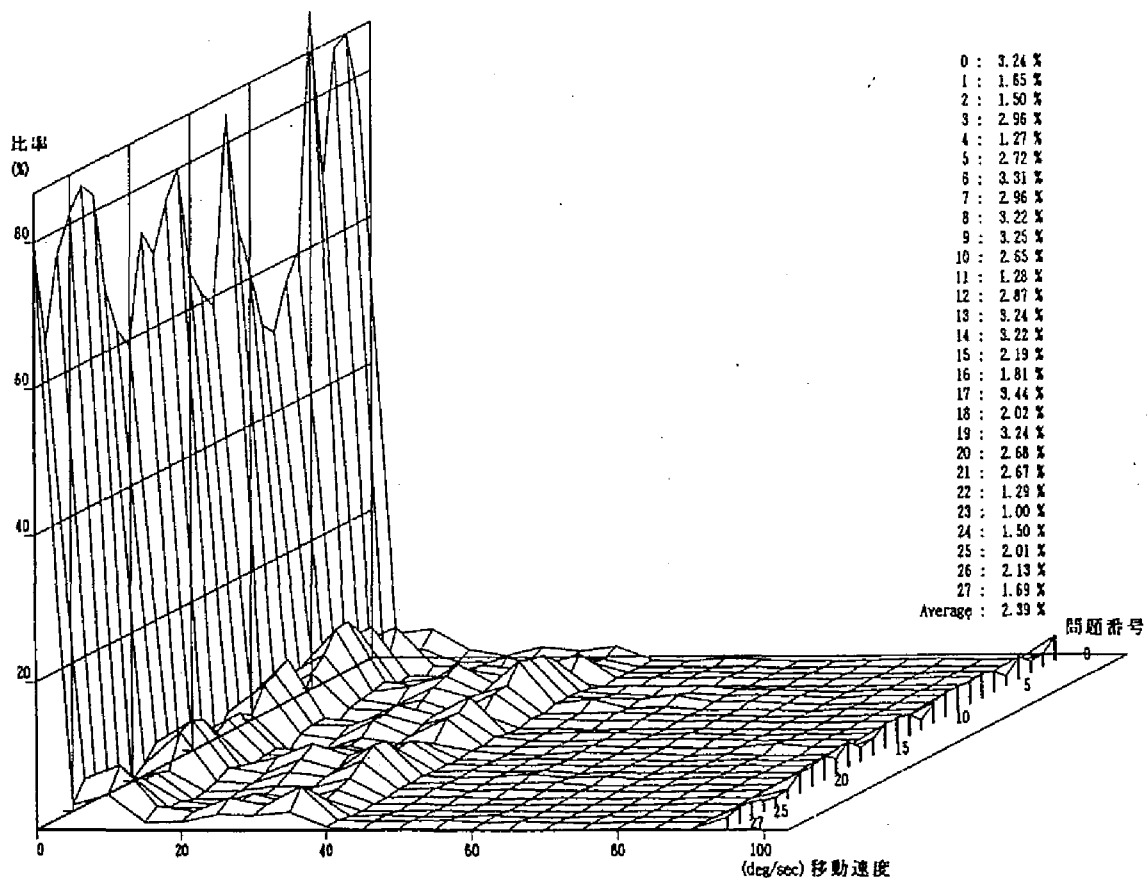


図 5-34 視点の移動速度分布(実験1)

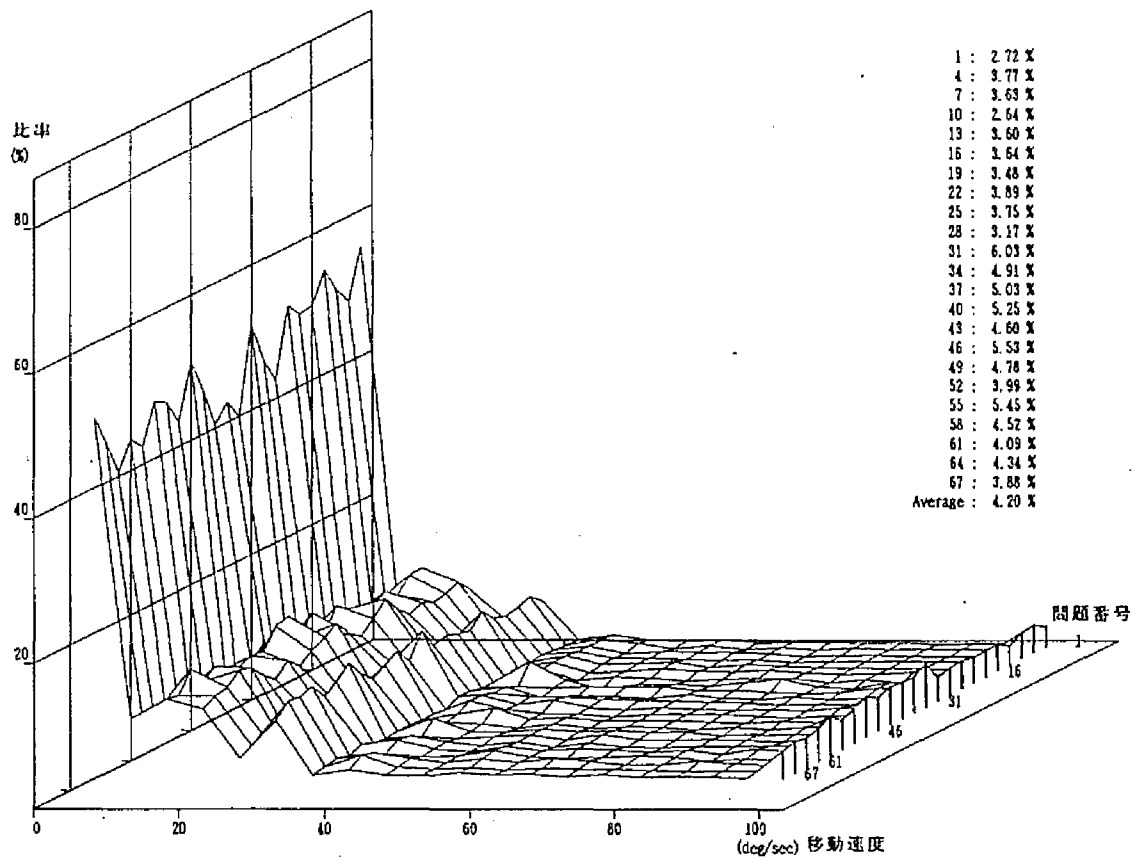


図 5-35 視点の移動速度分布(実験2、入力時間間隔 1 秒)

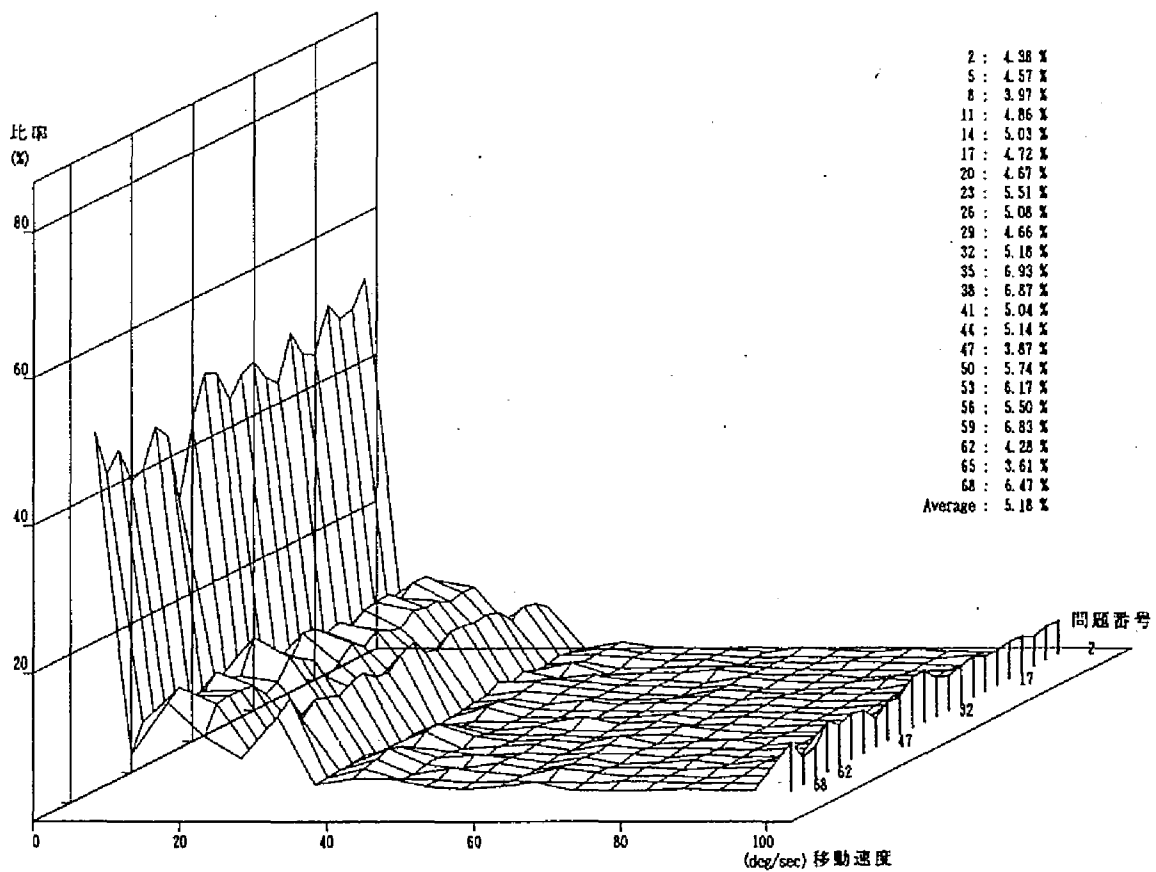


図 5-36 視点の移動速度分布(実験2、入力時間間隔 2 秒)

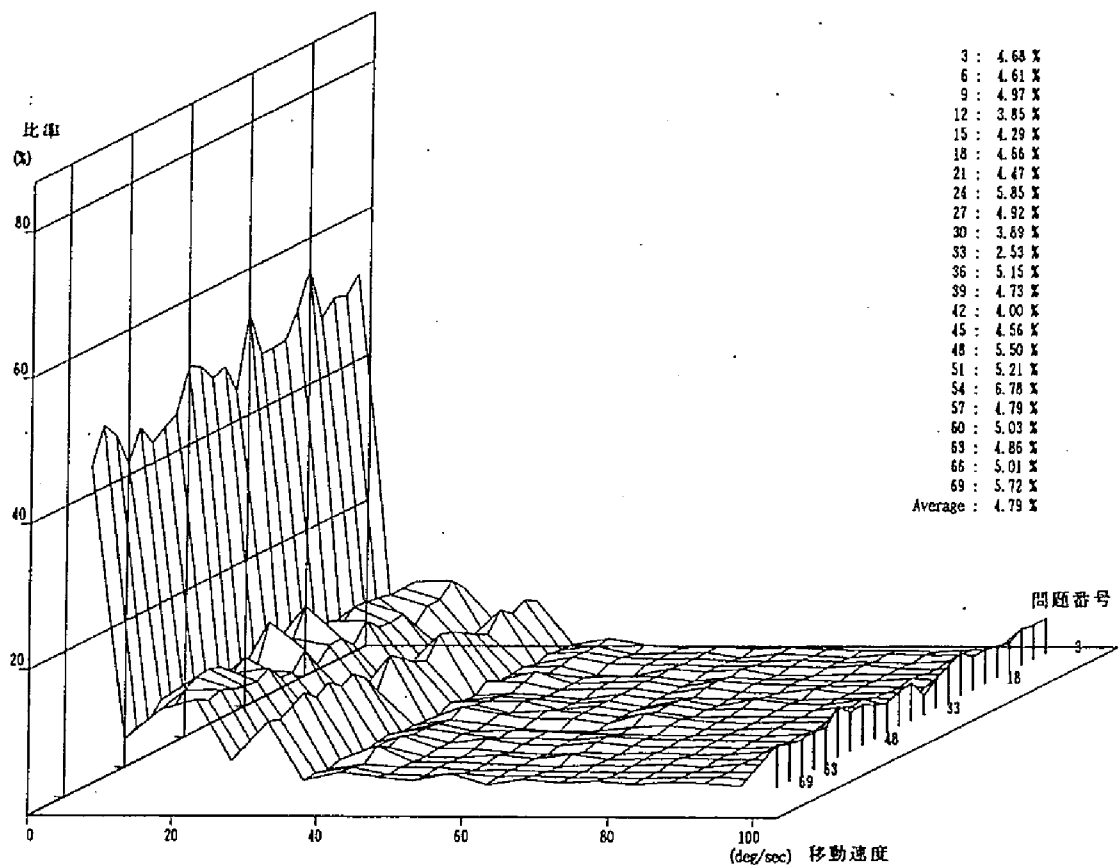


図 5-37 視点の移動速度分布(実験2、入力時間間隔 3 秒)

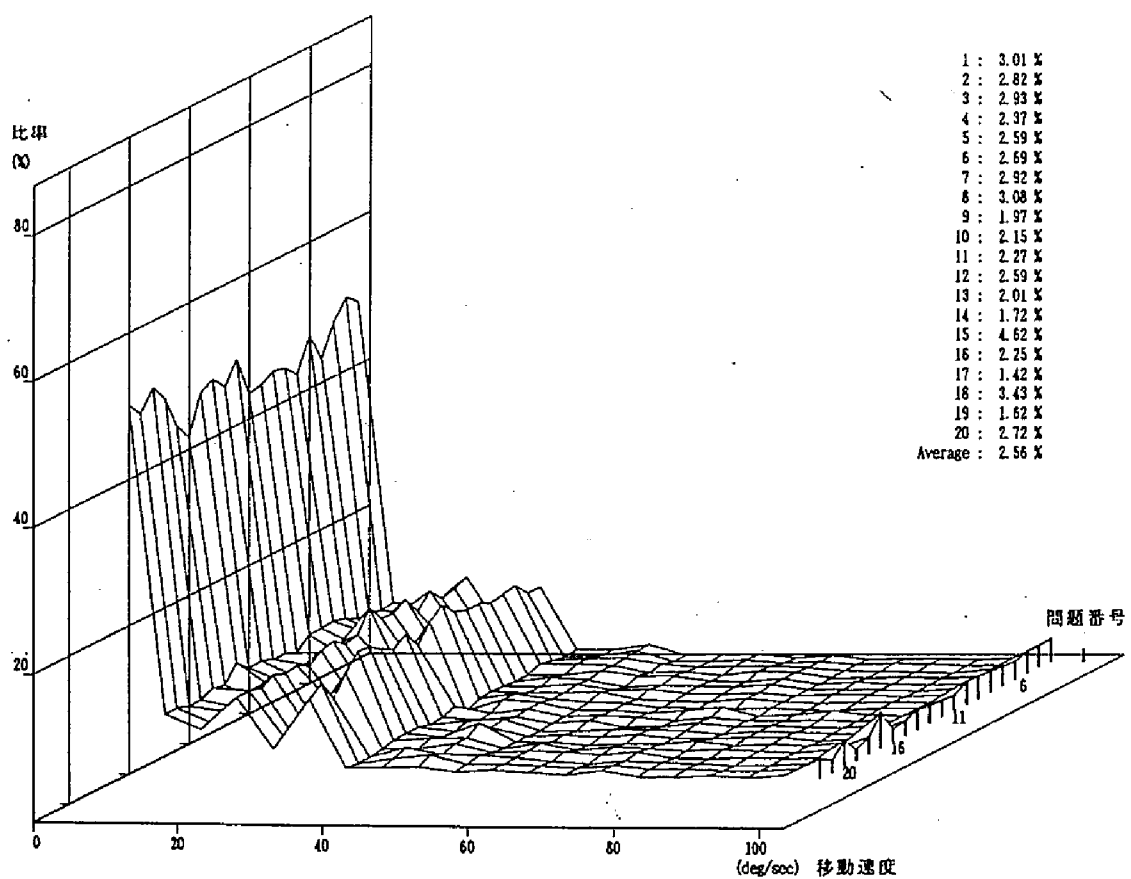


図 5-38 視点の移動速度分布(実験3)

表 5-6 実験2における回答時間の長かった問題とサッケード運動の比率

問題番号	回答時間	サッケード運動の比率
45	128秒	4.56%
50	99秒	5.74%
51	91秒	5.21%
66	88秒	5.01%
48	76秒	5.50%
サッケード運動の比率の平均		5.20%

表 5-7 実験2における回答時間の短かった問題とサッケード運動の比率

問題番号	回答時間	サッケード運動の比率
22	12秒	3.89%
68	12秒	6.47%
58	14秒	4.52%
53	14秒	2.53%
19	16秒	3.89%
サッケード運動の比率の平均		4.26%

表より、全体的に回答時間の長かった問題はサッケード運動の比率が高く、短かったものは低いといえる。これは、回答時間が長くかかった問題では、回答の手懸かりとなる遷移が見つけられずにサンプル図と状態図を頻繁に見比べていたためと考えられる。この傾向は実験中の被験者の視点の位置を表すタイミングチャートからもみられた。

このように、眼球のサッケード運動は、視覚情報取り込みの切り替えに直接関与しており、その頻度は人間の視覚情報切り替えの頻度と考えられ、認知タスクの性質や被験者の問題解決行動を反映していることがわかった。これにより、サッケード運動の計測から人間の視覚情報収集行動や、その背後にある人間の意図を推定できる可能性があると考えられる。

5.4.2 注視

次に、アイマークレコーダより得られた視点位置より被験者の注視時間について考察する。図 5-39 に実験中の被験者の注視していた時間とその頻度分布を各実験別に示す。ここでは、視点の移動が 7.5deg 以内のものを視点の停留とみなし、かつその時間が 0.5 秒以上のものを「注視」しているものと仮定する。図の横軸は時間、縦軸はその頻度を示す。但し、ここでの「頻度」は、横軸の各時間から 0.5 秒間の注視回数と注視とみなすもの全体との比である。例えば、横軸の時間 1.0 秒にプロットされた点は、1.0 秒から 1.5 秒まで注視していた頻度の比率である。

もし視点の移動が単位時間あたり一定の確率 P で独立に起こるものと仮定すると、 $t \sim t+T$ 間の注視が起こる確率は $(1-P)^t - (1-P)^{t+T}$ となり、これは注視とみなす最小時間 T' 以上の間だけ視点が移動しない確率 $(1-P)^{T'}$ に、 $t \sim t+T$ の間の注視の頻度の比率 $F(t:T)$ をかけたものに等しいとすると、

$$(1-P)^{T'} \cdot F(t:T) = (1-P)^t - (1-P)^{t+T} \quad (5-5)$$

が成り立つ。(5-5) 式の両辺の対数をとって式を整理すると、

$$\log F(t:T) = t \cdot \log(1-P) + \log\{1 - (1-P)^T\} - \log(1-P)^{T'} \quad (5-6)$$

となる。ここで T 、 T' を一定とする（図5-39では $T = 0.5$ 秒、 $T' = 0.5$ 秒と考えた）と右辺の第2項、第3項は定数となり、注視時間 $t \sim t+T$ とその頻度の比率 $F(t:T)$ の関係は、片対数グラフ上で一本の直線として表されることになるが、図5-39では、実験1、2、3のいずれも注視時間が2～3秒未満とそれ以上の時間で直線の傾きが異なっている。これに対して視点移動確率 P が2つの時間帯で異なっていて、注視時間が2～3秒未満のとき（短期間の注視）と、それ以上のとき（長期間の注視）では、被験者の認知行動の形式の相違を反映するものと考えた。この違いはおそらく、短期間の注視が単に外界の視覚情報を取り込むだけかあるいは軽負荷の思考活動が伴うものに対して、長期間の注視は外界の視覚情報の取り込みだけでなくある程度負荷の大きな思考活動中であるものと思われる。即ち、長期間の注視は「見ている」より、むしろ「考えている」ために視点が停留しているものが多いのではないかと考えられる。

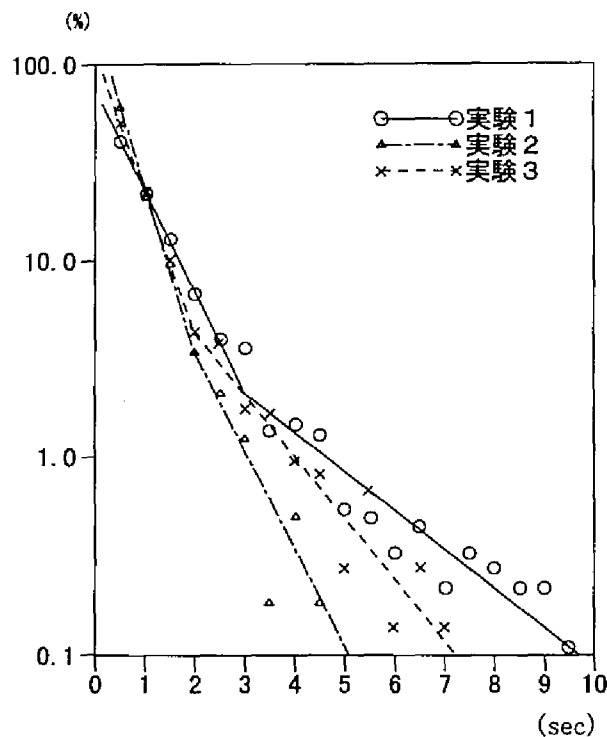


図5-39 各実験における注視時間の頻度分布

以上に述べた解釈をもとに各実験での分布の違いについて更に考察を進める。図5-39では、長期間の注視の多いものから順に実験1、実験3、実験2となっている。実験1で注視時間が長い理由としては、注視すべき対象が少ないためと与えられた認知タスクが実験2、3に比べて難しいためと考えられる。また、実験2と実験3は双方とも同じような判別課題であるが、実験3の方が長い注視時間のものが多く、実験3が実験2に比べて認知負荷が大きいものと考えられる。また、実験1、2、3の短期間と長期間の注視の分布を表す直線の傾きをみると、短期間での傾きはほぼ等しいが、長期間では実験2、3、1の順に傾きが小さくなるのがわかる。このことは、実験1、2、3とも短期間の方は同等の機構が視点移動を支配しているが、長期間の注視の方は負荷の違いがその機構に影響し、視点移動確率 P を変動させていることを示唆している。なお、実験2では長期間と短期間の傾きの差が小さいのは、認

知負荷が小さいことを反映している。

次いで、表 5-8 に実験 2 において 3 秒以上注視していた度数を入力時間間隔別(1、2、3 秒)に示す。

表 5-8 実験2における 3 秒以上の注視の頻度

入力時間間隔	3秒以上注視していた度数
1秒	51回
2秒	23回
3秒	26回

この表からもわかるように入力時間間隔が 1 秒のものは、2 秒、3 秒に比べ長期間の注視が非常に多い。これは、前述のように 1 秒のものは 2 秒、3 秒に比べ問題が難しいために長期間の注視が多くなると考えられる。また、実験 2 の注視時間分布のグラフが 2 秒を境にしてかわっていることから、実験 2 の判別課題では、1 回あたりの外界情報の取り込みおよび、その思考時間が 1.5~2.0 秒ぐらいのものが多くと結論づけられる。このように考えると、入力時間間隔が 2 秒、3 秒の問題では状態図の変化に思考活動が十分に追従しているために 5.3 節で述べた見逃し率も低く手懸かりとなる遷移に気付かないことも少ないのに対して、入力時間間隔が 1 秒の問題では状態図の変化を外界情報として取り込み、それを手懸かりに正解を判別するのが困難なため思考活動中と考えられる長期間の注視が多くなり、またその期間中には起こる遷移を見ているが外界情報として取り込んでいないため手懸かりとなる遷移に気付かないことが多くなるといえる。

ここで長期間の注視の一例として、ある被験者の行った実験 2、問題 16 (入力時間間隔 1 秒) の視点の位置および手懸かりとなる遷移を表したタイミングチャートを図 5-40 に示す。また図 5-41 にその問題中に得られた各種データのタイムライン表示を、図 5-42 にこの問題の各サンプルを示す。

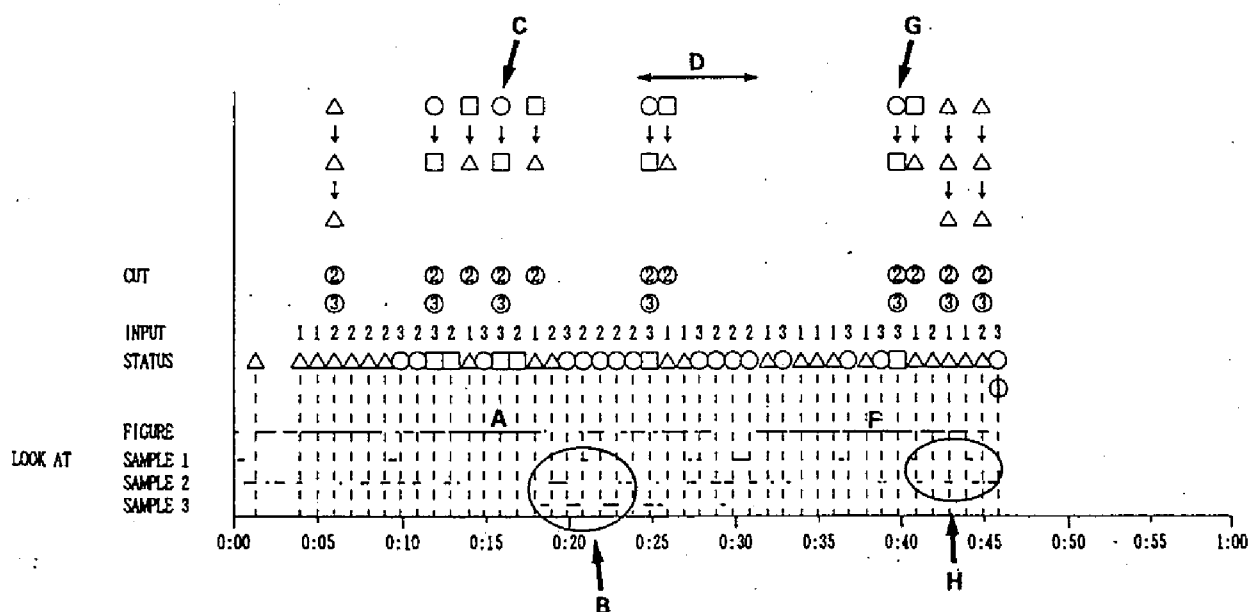


図 5-40 長時間の注視のあった問題のタイミングチャート

(実験2、問題 16、入力時間間隔 1 秒)

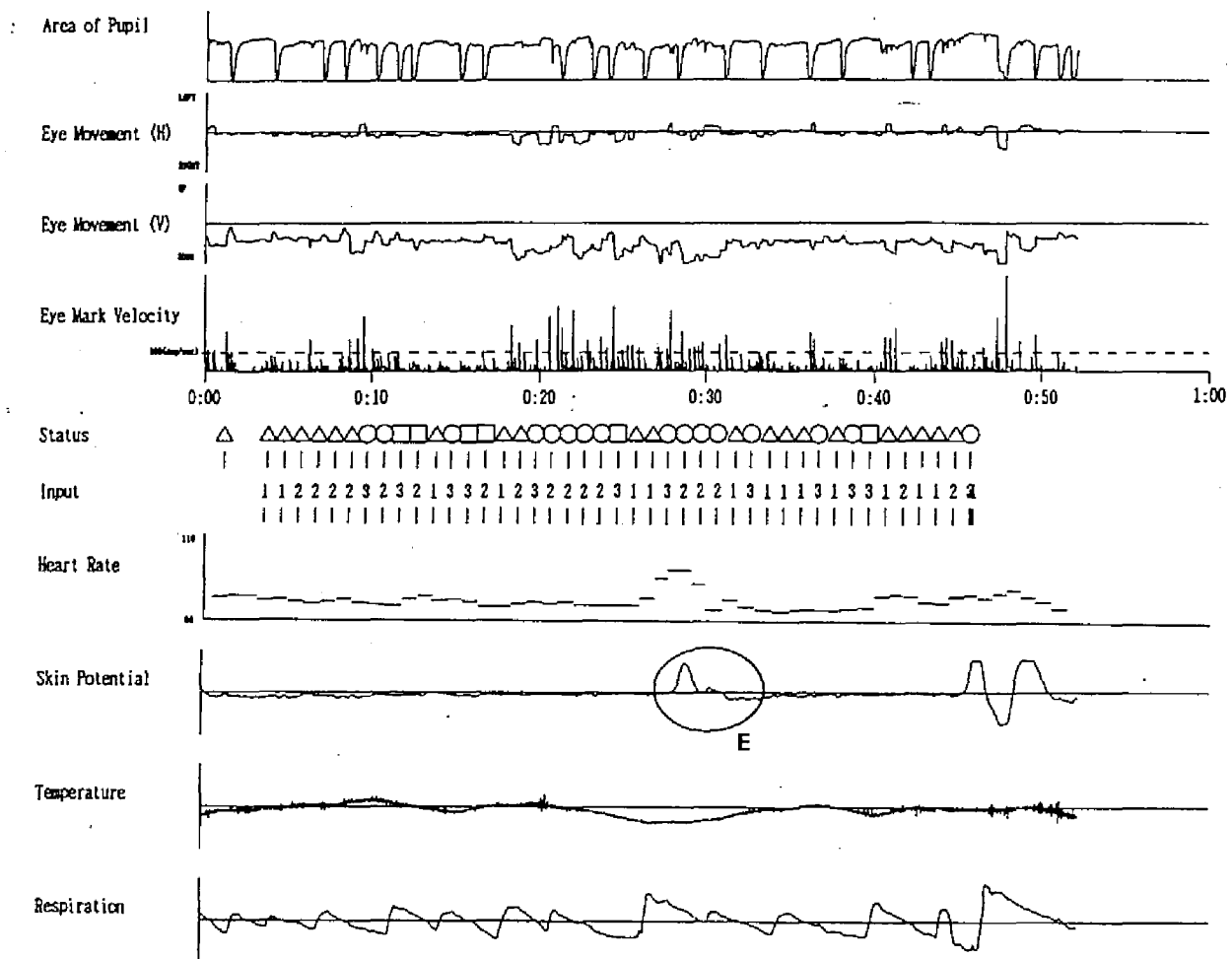


図 5-41 実験2、問題 16 で得られた各種のデータのタイムライン表示

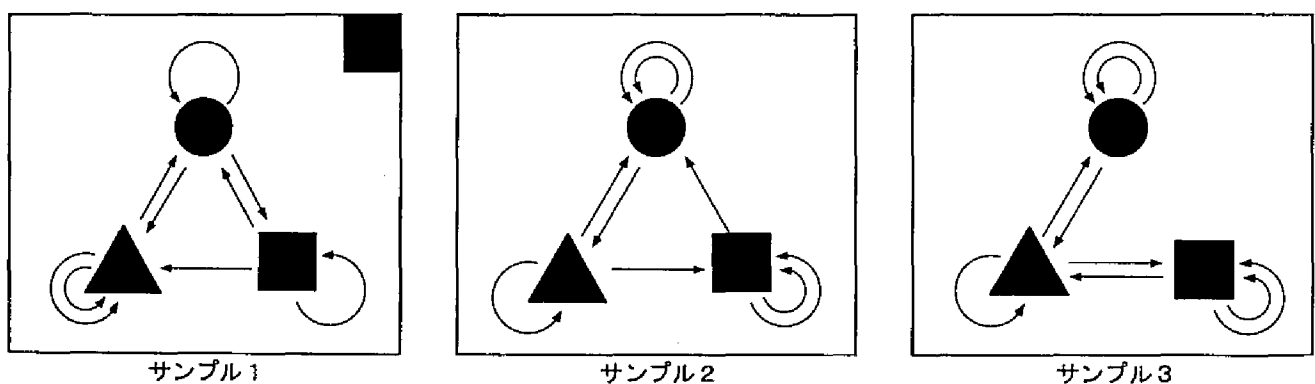


図 5-42 実験2、問題 16 のサンプル

この例では、問題開始から 13～18 秒の約 5 秒間、状態図を注視しており（図中の A）、その後、各サンプル図を見比べている（B）。この注視の間にはそれぞれ起こった遷移をすべて認識しているのではなく、結局被験者が得た情報は問題開始から約 16 秒後の○→□（C）を見て、“○から□か、あるいは□から○への遷移がある”というものであった。サンプル図（図 5-42）では、○と□の間に遷移が起り得ないのはサンプル 3 だけであるので、被験者は各サンプル図を、サンプル 3→2→3→1→3…と見比べた後（B）、サンプル 3 を消去している。これは、(i)その時の被験者の発話「□と○の間に関係があるから 3 番ではない」（D）、(ii)被験者はそれ以降、サンプル 3 をほとんど見ていない、

(iii)サンプル 3 を消去した直後に皮膚電位に変化がみられる (E)、の 3 点より明らかである。なお、皮膚電位の変化は、問題開始直後や回答直後にも頻繁にみられ、これにより被験者の認知活動に大きな変化があった場合に起こる生体反応であると考えられる。また問題開始から約 37～42 秒後にもう一度長期間の注視 (F) があり、この間に○→□の遷移 (G) を見た後、サンプル 1 とサンプル 2 を見比べて (H) その遷移がサンプル 2 では起こらないことを確認して回答に至っている。一方、入力時間間隔が 3 秒と長い場合の例として、問題 21 のタイミングチャートを図 5-43 に示す。

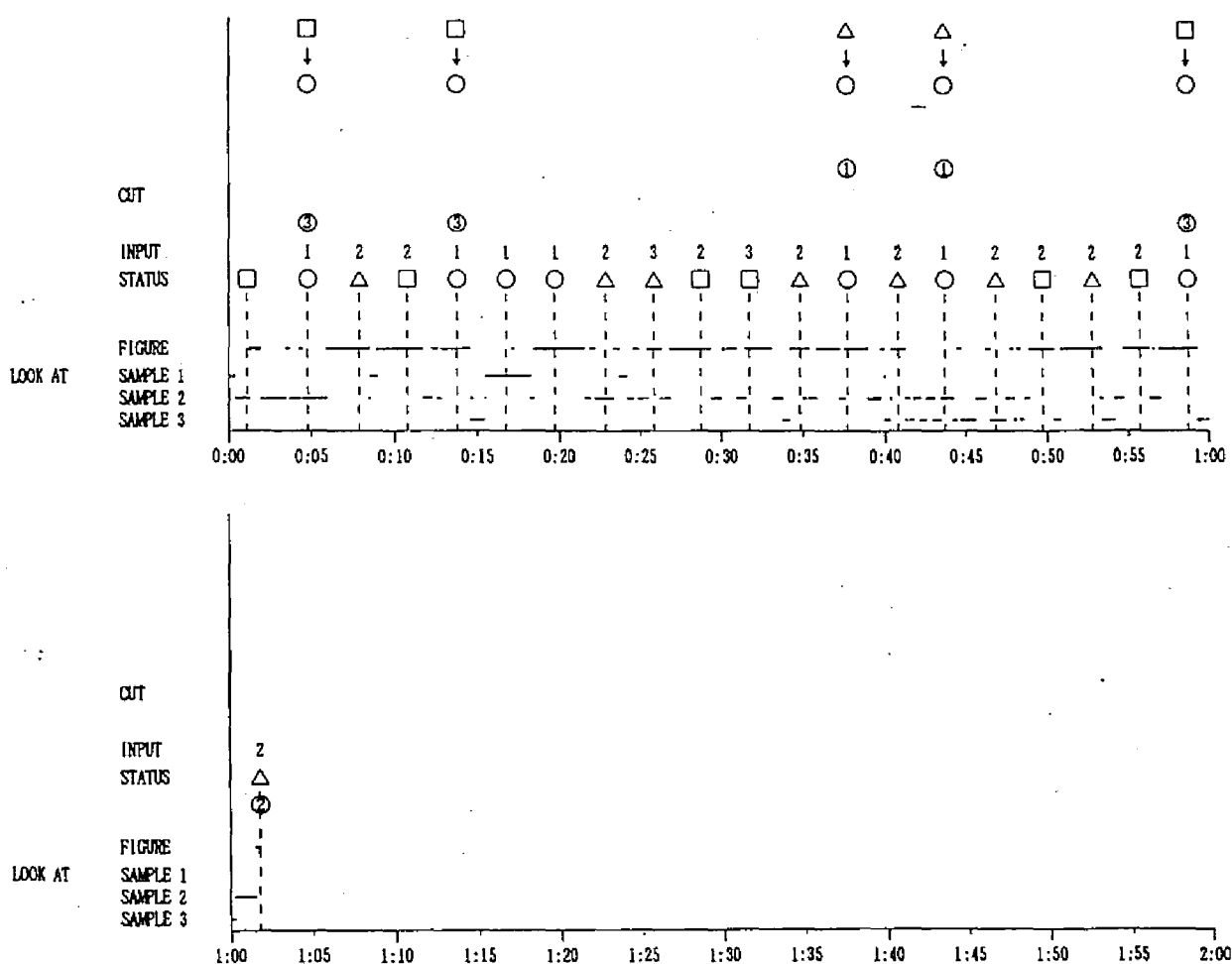


図 5-43 長時間の注視がなかった問題のタイミングチャート

(実験2、問題 21、入力時間間隔 3 秒)

この図でもわかるように、遷移を見た後、次の遷移が起こるまでの間に何らかの情報を得て各サンプルを見比べていることが多い。そのため、被験者は長期間注視していることがほとんどない。入力時間間隔が長いと、外界情報の取り込みおよびその思考に十分な時間があるために視点が頻繁に動き、長期間の注視が少なくなる。

以上のように、実験で得られた視点の位置を分析することにより、発話報告や各種の生理信号データと併せて、認知活動の詳細を追跡することが可能となった。また、本項で述べた被験者の特性は他の被験者についても同様にみられた。次項では、他の視覚系データである瞳孔反応について、観察した結果を述べる。

5.4.3 瞳孔反応

本研究では認知行動中の被験者の瞳孔反応を調べるために瞳孔面積測定用画像処理装置を製作したが、瞳孔照明用の赤外線LEDの反射像が瞳孔像中に映りその部分が明るく撮影されることがあるため二値化した際にLEDの反射像が瞳孔像の中に白く映る。そして、眼球が回転するとこの反射像も瞳孔上を動き、二値化したときの黒い瞳孔部分の面積が変わるため正確な瞳孔面積を得ることはできなかった。そこで、画像処理装置により得られたデータだけでなく実験中にVTRに記録した瞳孔画像を観察した結果について述べる。

5.1.2 項で紹介した心理生理学の知見では瞳孔と精神活動との関連は主に散大と結び付けられていて、収縮との関連についてはあまり触れられていない。しかし、本研究で観察できたのはほとんど収縮反応であった。これは、実験中に被験者が比較的暗いディスプレイを見ているので、瞳孔がすでに散大していたためと考えられる。また、瞳孔の変化は個人差が大きく、顕著に変化する被験者もいれば、その変化がほとんどみられない被験者もいた。ここで、観察された瞳孔の収縮反応でほとんどの被験者に共通して現われた事例について以下に示す。

(1)紙に回答図を描く時

実験1において、回答後被験者に図を描いてもらうが、このときに瞳孔は顕著に収縮し、図を描き終るまで続く。

(2)あやふやな記憶を再生しようとする時

各問題が終った後、被験者に解答方策などについて振り返って話してもらうが、その際あやふやな記憶を再生しようとする時に瞳孔の収縮がみられた。

(3)対象物を注視した直後

被験者は解答のために状態図やサンプル図を注視することがしばしばあるが、図を詳しく見ようとする時に、視点の固定の後約0.2～0.5秒後に瞳孔の収縮がみられた。

(4)判別実験において状態図の変化が起こった時

すべての遷移の後に瞳孔の収縮がみられたわけではないが、判別の手懸かりとなると思った遷移の約0.2～0.5秒後に瞳孔が収縮し、その後サンプル図を見比べている場合が多くみられた。

一般に瞳孔の収縮反応は焦点調節にも現われるといわれているが、上述の事例の(1)、(3)、(4)はそれに対応するものと考えられる。しかし、事例(2)ではなんらかの負の感情生起が瞳孔収縮に関係していると思われる。なお、瞳孔が収縮している時間には多少の長短はあるが、(1)を除くと0.2～0.3秒で瞳孔径が縮小し、次に0.3～0.5秒で元にもどるものが多かった。

本研究で製作した画像処理装置に用いた方法は、正確な瞳孔面積のリアルタイム計測という目的からはなお検討すべき点があり今後の問題であるが、「瞬目」そのものはかなり明瞭に把握でき、その発生時刻をリアルタイムに得られることがわかった。次項ではこの瞬目について考察する。

5.4.4 瞬目

瞳孔面積測定用画像処理装置で得られた瞳孔面積には、被験者が瞬目すると図5-44のような波形が得られる。

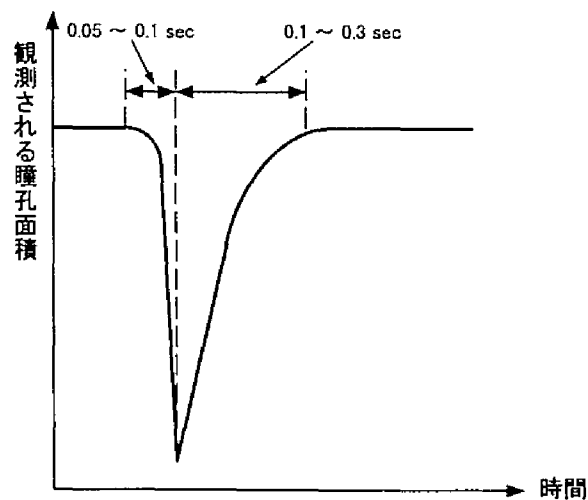


図 5-44 瞬目時に瞳孔面積測定装置で得られる波形

瞬目時には瞼によって瞳孔が隠れるため、得られる瞳孔面積は急激に減少する。瞬目は非常に速く、瞼が閉じるまでに約 0.05～0.1 秒しか要しないが、本研究ではサンプリング間隔を 1/30 秒としているため取り逃すことはない。また、瞼が完全に閉じてから再び開くまでの時間は多少個人差はあるが、おおむね 0.1～0.3 秒程度である。本節では、実験中に起こる瞬目について瞬目から次の瞬目までの時間間隔に注目して、その分布を考察する。

図 5-45～図 5-47 に、ある被験者の瞬目間隔の分布をヒストグラムにしたものを実験 1、2、3 に分けて示す。なお、瞬目間隔は、0 秒以上 0.1 秒未満、0.1 秒以上 0.2 秒未満というように 0.1 秒ごとの頻度を計数し全瞬目間隔数で割って比率を％で示している。

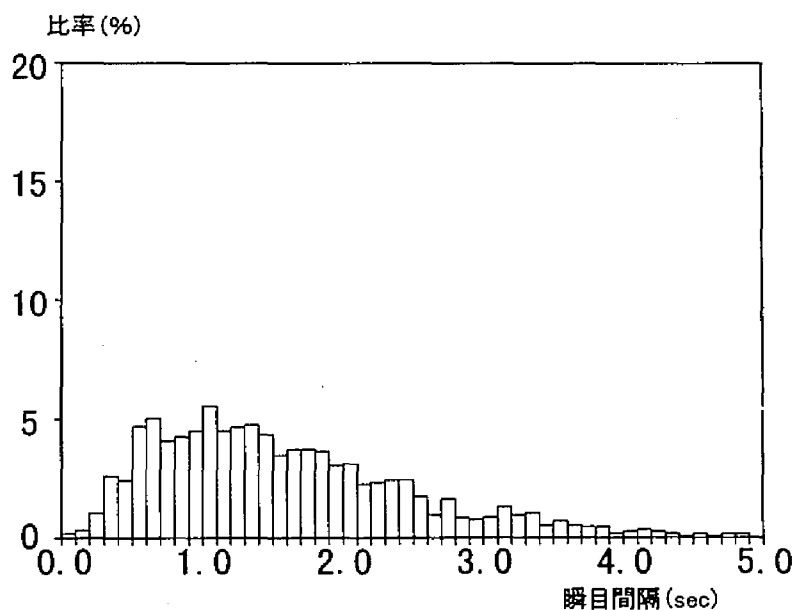


図 5-45 瞬目間隔の分布(実験1)

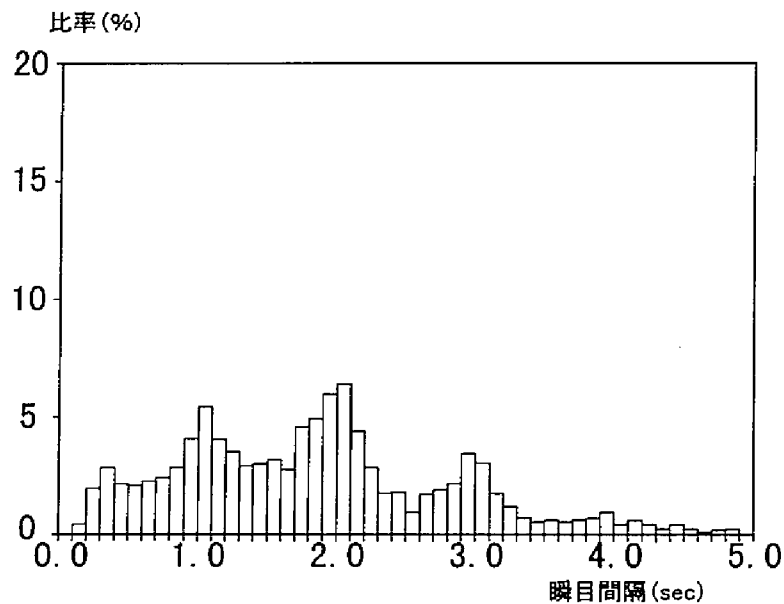


図 5-46 瞬目間隔の分布(実験2)

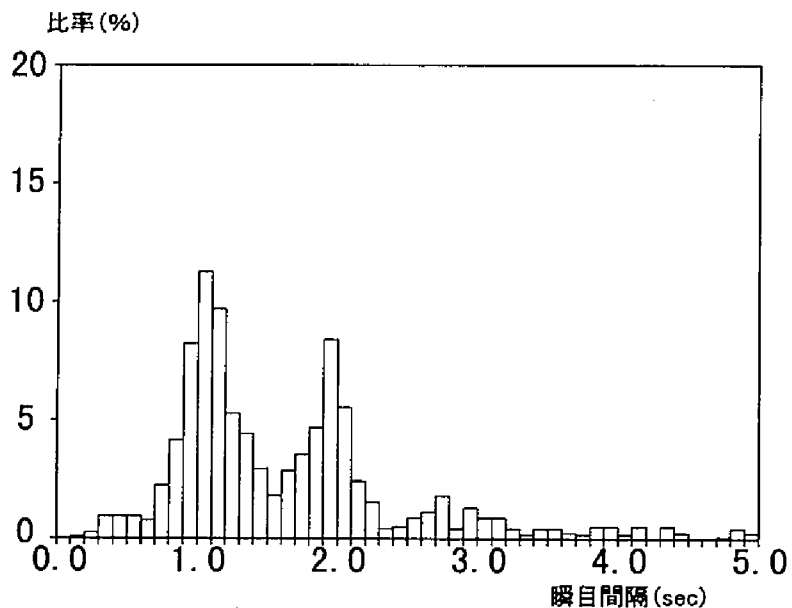


図 5-47 瞬目間隔の分布(実験3)

実験1は被験者自身が入力キーを操作して問題が行われるため、瞬目間隔は1秒のあたりでピークになりなだらかな分布をしているが、実験2では瞬目間隔がそれぞれ1、2、3秒あたりに大きなピークが生じている。これは、入力がそれぞれ1、2、3秒間隔で自動的に行われるため、それによって起こる状態図の変化にタイミングをあわせているのではないかと考えられる。一方、実験3でも同様に瞬目間隔が1秒あたりに大きなピークがあり、2秒、3秒あたにもピークがみられる。実験3の各問題の入力間隔はすべて1秒であるので、瞬目間隔が1秒あたりの大きなピークは状態図の変化にタイミングをとっているものと考えられる。なお、2秒、3秒あたりのピークは、状態図の変化が速いために1回、あるいは2回スキップしていると考えられる。また実験2の瞬目間隔の分布を入力キーの時間間隔別に分けて図5-48～図5-50に示す。

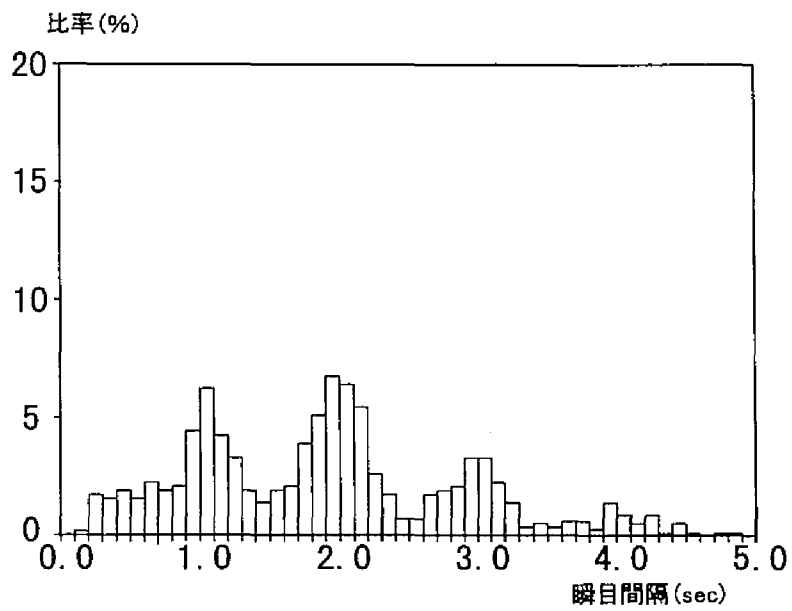


図 5-48 瞬目間隔の分布(実験2、入力時間間隔 1 秒)

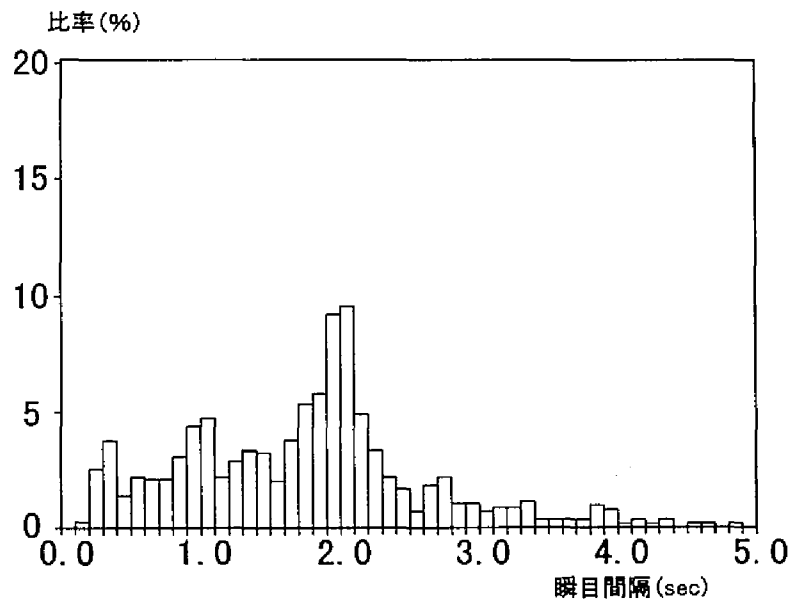


図 5-49 瞬目間隔の分布(実験2、入力時間間隔 2 秒)

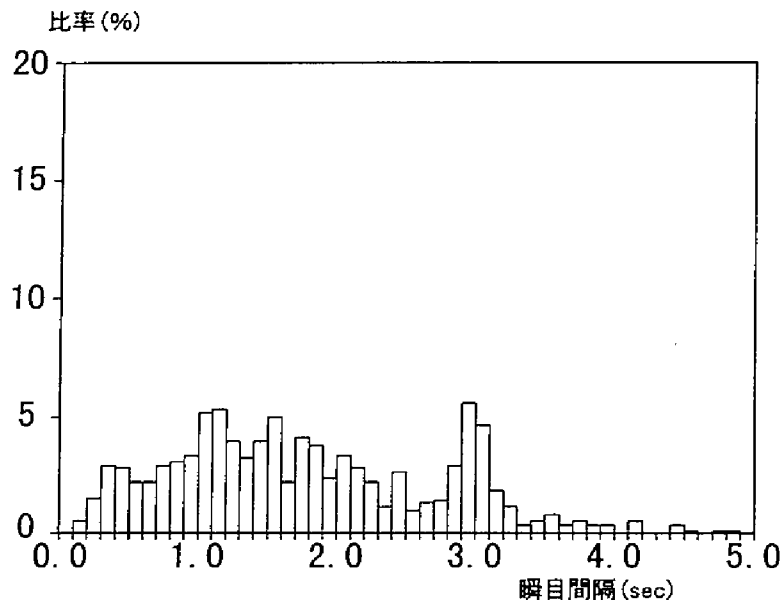


図 5-50 瞬目間隔の分布(実験2、入力時間間隔 3 秒)

入力時間間隔が 1 秒のヒストグラムは、1、2、3 秒に大きなピークがみられ状態図の変化にタイミングをあわせていることがわかる。このヒストグラムの分布は、同じ入力時間間隔 1 秒の実験 3 に比べて、1 秒のピークが小さく 3 秒のピークが大きくなっている。これは、実験 2 の場合、入力時間間隔が 1 秒、2 秒、3 秒、1 秒、2 秒…と順にかわっていくので、すべて入力時間間隔が 1 秒である実験 3 の問題に比べて、常に状態図の変化にタイミングをあわせるのが困難になるのではないかと考えられる。また、入力時間間隔が 2 秒、3 秒のヒストグラムでは、状態図の変化を情報として取り込む十分な時間があるために、タイミングのあっているものが多くそれぞれ 2 秒、3 秒に大きなピークがみられる。特に、入力時間間隔が 3 秒のヒストグラムは実験 1 における分布に瞬目間隔が 3 秒のピークを重畳させたような分布になっている。これは、自動的に起こる状態図の変化を外界情報として取り込んでいるときの瞬目の分布と、その情報を用いて思考しているときの被験者固有の瞬目の分布が重畳しているものと考えられる。

このように、各実験での被験者の瞬目間隔の分布を解析することにより、前述の被験者の認知行動の特性を裏付けることができ、さらに瞬目が視覚情報取り込みのタイミングに深く関与していることがわかった。

5.4.5 皮膚電位反応 (SPR)

皮膚の電気的特性が情緒的状況に対応して変化することはよく知られていて、情動、認知などの心理的要因と皮膚電気活動との関連については多数の実験研究が報告されている。皮膚電気活動は外部刺激やストレスに反応して生ずるエクリン汗腺からの覚醒発汗と深い関係がある。エクリン汗腺は手掌や足趾に最も多い。皮膚電気活動では一過性の瞬時的変動を反応、持続的変動を水準と呼び、これを測定する際に、外部電流源を用いる場合を「伝導」、自発的な皮膚の電位差を利用する場合を「電位」という。皮膚電気活動の指標には、これらを組み合わせて次の 4 つがある。

- (i) 皮膚伝導反応
- (ii) 皮膚伝導水準
- (iii) 皮膚電位反応

(iv) 皮膚電位水準

本実験では、一過性の電位変動に注目して、手掌の皮膚電位反応(Skin Potential Response; SPR)を測定対象とした。被験者らの測定データから SPR は情動変化をよく反映することが観察された。そこで、図 5-41 のようなタイムライン表示を用いて、実験時の SPR と発話記録を対比して SPR 変動をもたらす状況要因を推定した。その結果は、

- (1) 意図の転換
- (2) 手懸かりを見出した時
- (3) 記憶しようとしたり、想起しようとする時
- (4) 混乱したり、いらいらする時
- (5) 失望する時
- (6) 思いがけない状況が出現した時
- (7) 喜んだ時
- (8) 後ろめたい時

などであった。SPR の波形の特徴では、二相性振動がスイッチを押すなどの行動を伴う目標指向性活動とよく対応していたほかに、振幅の大きいときは(1)、(2)と対応することが多かった。このように SPR は被験者の情動変化をよく反映しており、状況要因を探る一つの手懸かりとして有用な指標であることが本実験の結果からも確かめられた。

5.4.6 心拍率

心理生理学では、血圧、血流率も用いられるが、瞬時心拍数が指標として最もよく用いられる。実験心理学の研究から心拍率(Heart Rate; HR)は「知覚活動中に低く、認知活動中に高くなる」ことが示唆されている。この傾向は本実験でも確かめられた。知覚活動による低下は、目のフリッカーテスト中の HR 計測で確認した。指標点滅の閾値周波数に近づくとつれ、HR の減衰がテストした被験者すべてに観察された。また、認知活動中に高くなる例は図 5-41 のタイムライン表示中の E で示された部分と同時期に HR が上昇しているのがわかる。これは、問題解決や手懸かりの発見に対応している。しかし、HR は自律神経系の生理機構により呼吸に同期して変動する成分もあり、一概に瞬時 HR の変動を心理的要因のみに帰着することはできない。

以上の考察から、本実験では瞬時 HR よりむしろ認知タスク中の HR の平均値を指標とし、ある被験者の 3 つの実験の問題ごとの平均心拍率を求めた。各実験で問題の進行に伴う平均 HR の結果を図 5-51 に示す。

この図からわかるように、実験 1 では問題が進行するほど平均 HR が下がっているが、実験 2、3 では問題が進行しても平均 HR の減少傾向は見られない。このような時間的傾向の違いの理由として、次のように考えた。「実験 1 は自分で規則を調べるものであり、問題が進むほど解き方になれてくるが、実験 2、3 はプログラムにより自動的に状態遷移が与えられ、被験者には問題がいつも新規な状況となって慣れが生じない。」 また、実験 2 より実験 3 の方が常に平均 HR が高く、実験 1 では初めは実験 3 より HR が高いが、後半では実験 3 より低くなっている。このような 3 つの実験の平均 HR の差異は、被験者にとっての実験間の認知負荷量の差を反映しているものと考えられる。

以上、平均 HR の比較により、実験 1、2、3 が被験者に与える負荷について 5.4.2 項の注視時間の検討では考慮しなかった認知負荷の時間的変動も含めて推定することができた。

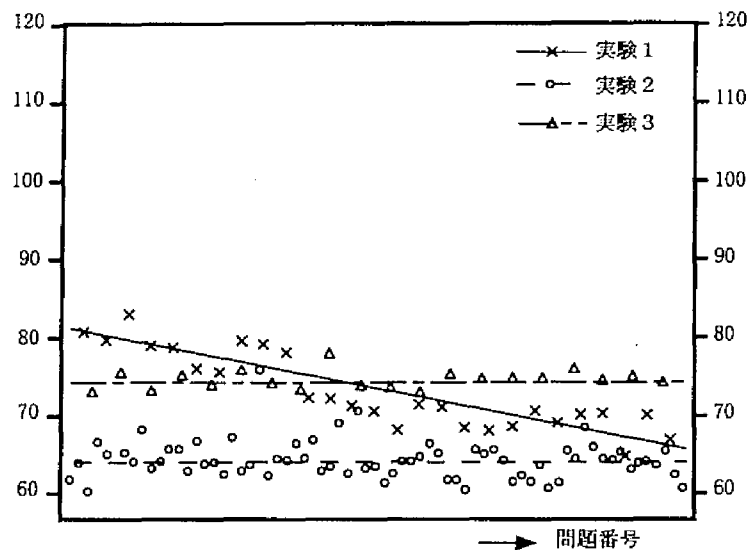


図 5-51 問題ごとの平均心拍率

5.5 実験データによる認知行動の追跡

本節では、アイマークレコーダより得られた視覚系データおよび生理電気信号により実験中の被験者の認知行動を追跡した例を示す。ここでは、ある被験者が行った実験 2 の問題 14 をとりあげる。図 5-52 に視点の位置と判別の手懸かりを表すタイミングチャートおよび得られた各種データのタイムライン表示を、図 5-53 にこの問題のサンプル図を示す。

まず、図 5-52 の視点の位置により、被験者の認知行動を追跡する。問題開始後 1 秒までに状態図、サンプル 1、2、3 と順に見ているのは、問題提示画面に状態図、サンプル 1、2、3 と順に表示され、被験者はそれを目で追っているためである(図中の A)。11~12 秒後(B)と 17~21 秒後(C)に各サンプル図を見比べているのは、その直前に $\Delta \rightarrow \Delta$ という遷移が起こっており被験者は判別の手懸かりとして $\Delta \rightarrow \Delta$ の状態遷移に着目しているのがうかがえる。このうち、18 秒後に $\Delta \rightarrow \Delta \rightarrow \Delta$ という遷移(D)が別の入力キーにより起こったため、被験者はその直後にサンプル 3 が消去できることに気付いている。これは、それ以降にサンプル 3 をほとんど見ていないことからわかる。その後 35 秒までの間には、24 秒後に $\square \rightarrow \Delta$ という判別の手懸かりとなる遷移(E)が出現しているにもかかわらず、被験者はその遷移を見ていないためにサンプル 2 を消去していない。そして 36 秒後に起こった $\Delta \rightarrow \square$ という遷移(F)を見た後、各サンプルを見比べて回答に至っている。これを図中下部のタイムライン表示でみると、正解でないサンプルを消去したと考えられる 15~20 秒後(G)、36~40 秒後(H)に以前まで状態図の変化にタイミングをあわせていた瞬目が一時的にとまっており、その直後に皮膚電位も変化している。また、このときの被験者の発話報告はそれぞれ「 Δ が二重構造でことは 3 番は削除できる」(I)、「 Δ から \square への道があるってことは 1 番だな」(J)となっている。これらのデータから考えると、被験者は問題開始から 18 秒後に起こった $\Delta \rightarrow \Delta \rightarrow \Delta$ の遷移を手懸かりにサンプル 3 を消去し 36 秒後に起こった $\Delta \rightarrow \square$ の遷移を手懸かりにサンプル 2 を消去して正解を判別したと考えられる。

このように、実験中に得られた各種のデータのタイムライン表示や発話報告などを併せて分析することにより、被験者の解答方策、そのときの着目点、正解に至る過程などを詳細に追跡できる。

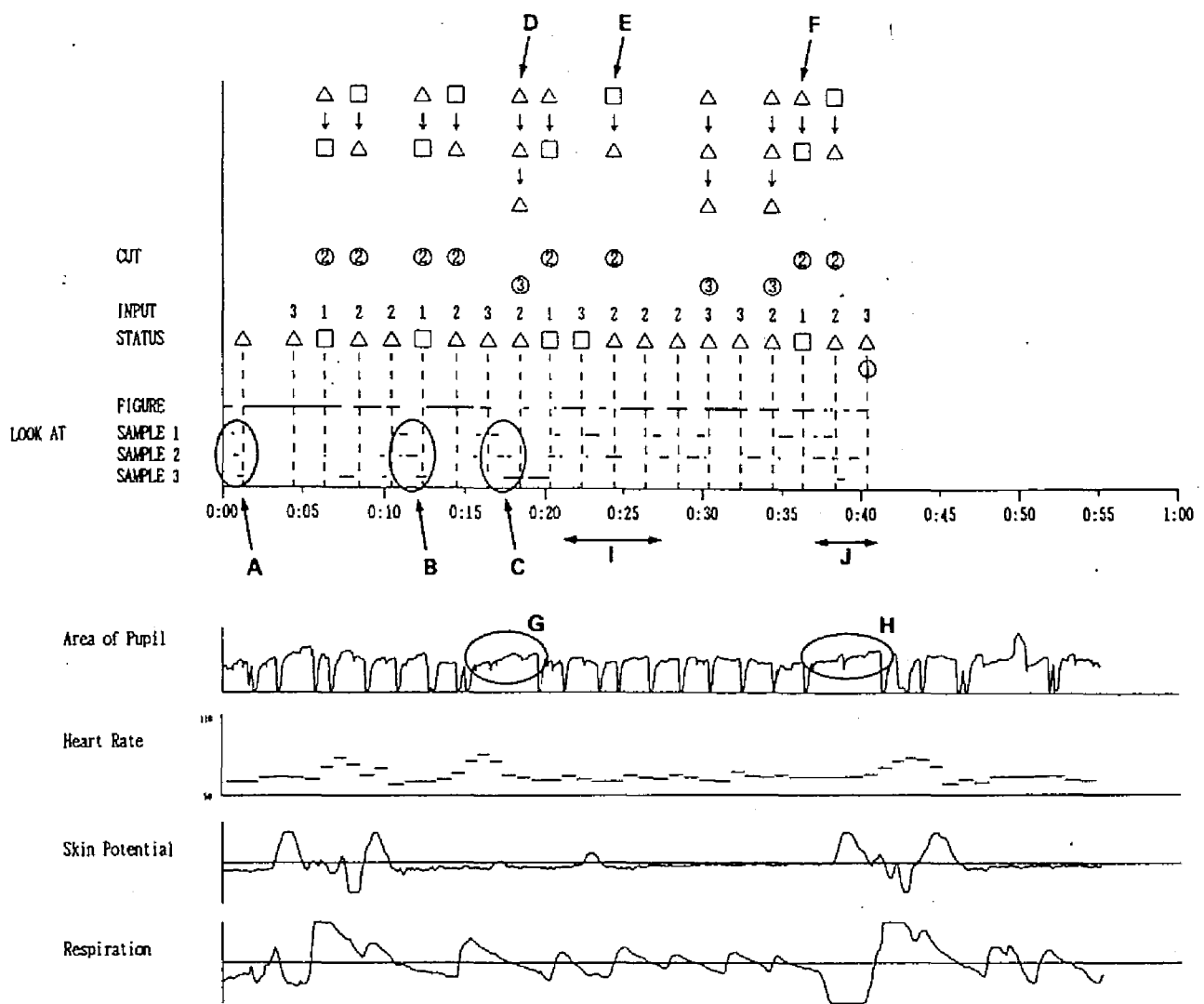


図 5-52 実験で得られた各種データのタイムライン表示

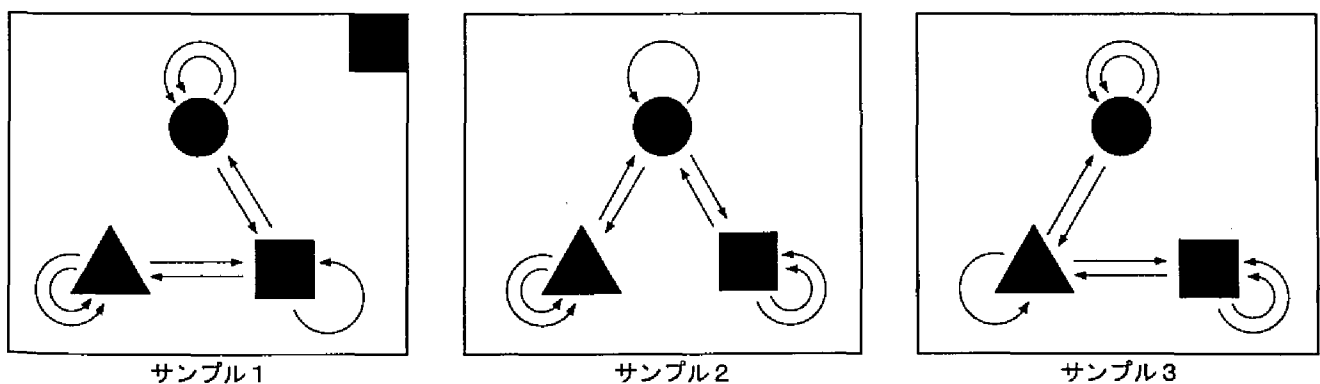


図 5-53 実験2、問題 14 のサンプル

以上のように、本節では実験中に得られた各種のデータのうちアイマークレコードより得られる視覚系データおよび各種の生理電気信号に注目した分析法とその結果を示し、被験者の認知行動の特性との関連や思考過程の追跡に有効であることを確認した。

5.6 まとめ

本研究では、高度なヒューマンインタフェースである相互適応型インタフェース技術の確立を目指して人間情報行動計測技術に関する基礎実験を行った。具体的には、ヒューマンインタフェースにおける人間の認知情報処理行動を模擬し、状態遷移モデルを用いた学習と判別に関する認知タスクをコンピュータ画面との対話で遂行させる被験者実験を行った。その際、被験者の認知情報行動特性の分析のためのデータとして、被験者から得られる各種のデータを計測し、オンライン認知情報処理行動の分析への適用性を検討した。測定したデータは、操作記録、発話記録、瞳孔径、眼球運動、瞬目、心拍、皮膚電位反応、顔面温度など多岐にわたり、そのデータ量も膨大なものとなるため、データ処理分析の効率化・総合化が課題となった。そのため、データ測定系、分析系の自動化に努めた。特に、本研究では視覚系指標に着目し、市販のアイカメラを用いて瞳孔径のリアルタイム計測のための装置を新たに開発した。また、多角的なデータを総合分析するために、分析に用いる指標の時系列変化を同一時間軸でグラフ化したタイムラインチャートを用いた。

本研究では、アイカメラによるリアルタイム瞳孔径計測装置を新たに開発したとともに、(1)問題解決方策、(2)認知課題の主観的な難易度の解釈、(3)問題解決時のメンタルイメージとその効果、(4)ストレス時の認知行動、(5)眼球のサッケード運動、(6)注視、(7)瞳孔反応、(8)瞬目、(9)皮膚電位反応、(10)心拍率、を対象に認知行動の関連を分析し、結果について検討した。これら(1)～(10)について、結果を要約すると以下ようになる。

(1)問題解決方策

学習課題では状態遷移モデルを記憶する際の方策として、①「状態依存型記憶」と②「入力依存型記憶」がみられた。①ではすべての遷移を記憶したという判断を行いやすいが、記憶量が多くなるため負荷が大きい。また、②では状態遷移モデルに含まれる各種のパタンを用いて記憶量を減らしているため負荷は小さくなる反面、判断の過程ですべての遷移を記憶したという未熟な確信が惹起されやすい。一方、判別課題では、学習課題のようにまず状態遷移モデルの規則を完全に把握してから正解を選択するという方法ではなく、3つのサンプルから1つずつ消去していくことのできる手懸かりを見つける方法、即ち「消去法」で正解を判別している。この方策は、正解を判別する種々の方策のうちで負荷が最も小さいと考えられる。

(2)認知課題の主観的な難易度

学習課題では、①に関連して状態遷移モデルのエントロピが、②に関連してモデルに含まれるパタンが、難易度に影響していることがわかった。一方、判別課題では、各サンプル間の「類似度」が正解を判別する際の難易度に影響していると思われる。また、実験2において自動的な状態遷移が速い問題(入力時間間隔1秒)では、明らかに回答に要する遷移数が多くなり解答効率の低下がみられた。認知処理の効率は情報提示の速度がある限界を越えると低下すると考えられる。

(3)問題解決時のメンタルイメージとその効果

学習課題では、問題終了後に被験者の描いた回答の図から問題解決時のメンタルイメージをある程度推定できる。また状態遷移図の提示前後の回答時間特性から、メンタルイメージの定着が問題解決に効果の大きいことを確認した。

(4) ストレス時の認知行動

各実験では被験者にいくつかの形式のストレス課題を与えたが、視覚に未知の状況を与える問題が被験者に最もストレスを与えることがわかった。また、この場合の被験者の行動の特性と新規の状況への適応過程をこの実験方法で得られたデータより分析した。

(6) 眼球のサッケード運動

実験 1、2、3 のそれぞれで各問題ごとの視点移動速度分布を求め、そこからサッケード運動の比率と認知課題との関連性を検討した。その結果、サッケード運動が視覚情報取り込みの切り替えに直接関与しており、これより、人間の視覚情報収集行動や、その背後にある人間の意図を推定できる可能性があることが示唆された。

(6) 注視

実験データの視点移動履歴から、視点の移動が 7.5deg 以下で停留時間が 0.5 秒以上のものを注視として抽出し、各問題ごとの注視時間の頻度分布をグラフ化した。グラフでは、注視時間が 3 秒付近を境に直線の傾きが変化しており、解析の結果、短時間の注視が知覚活動を、長時間の注視が思考活動を反映していることがわかった。

(7) 瞳孔反応

実験中に得られた被験者の瞳孔像の VTR 記録を観察した結果、4 種の特徴的な瞳孔収縮が見られた。そのうち、焦点調節の影響があるもの以外に、あやふやな記憶を再生しようとするときなど、負の感情が生じたときに瞳孔が収縮することが確認された。

(8) 瞬目

開発した瞳孔面積測定装置より得られる瞳孔面積の変化から瞬目が抽出できるので、実験データから得られた瞬目について瞬目間隔分布を実験ごとにヒストグラム化した。その解析から、瞬目が角膜の保湿などの生理的機能だけでなく、視覚情報の取り込みタイミングのような認知行動を反映していることがわかった。

(9) 皮膚電位反応

実験から得られたデータのタイムライン表示から解析した結果、意図の転換、手懸かりを見出したとき、記憶しようとしたとき、想起しようとするとき、混乱したりいらいらするとき、失望するとき、思いがけない状況が出現したとき、喜んだとき、後ろめたいとき、に皮膚電位反応に二相性の振動がみられた。これより、皮膚電位反応が情動変化をよく表すことがわかった。

(10) 心拍率

実験中に得られた瞬時 HR は、自律神経系の生理機構に反応して変化することがあるため、認知タスク中の HR の平均値を指標として問題ごとの平均心拍率変化を求めた。その結果、実験 1 の学習課題では、問題が進むにつれて平均 HR が減少するが、実験 2、3 では変化がなかった。実験の認知タスクの内容から考えると、平均 HR が認知負荷量を反映していると考えられる。

また、本研究では実験で得られた複数の生理指標データと発話記録、操作記録とを同一タイムライン上で分析することにより、問題解決における認知行動を詳細に追跡するタイムライン表示分析法を提案し、例を用いてその有効性を示した。

本研究で行動計測の際に用いた計測手法や実験データの解析より得られた知見は、今後の相互適応型インタフェースを構築する上での要素技術である人間情報行動計測技術や認知過程推定法を確立するための重要な基礎を与えるものと考えている。

5章 参考文献

- [1] J.L.Andreassi, 辻敬一郎ほか訳: 「心理生理学」, ナカニシヤ出版, 1985.
- [2] O.Lowenstein, I.E.Lowenfeld: "The sleep-waking cycle and pupillary activity", *Annals of the New York Academy of Science*, No.117, 1964, pp.142-156.
- [3] D.Kahneman, W.S.Peavler: "Incentive effects and pupillary changes in association learning", *Journal of Experimental Psychology*, No.79, 1969, pp.312-318.
- [4] E.H.Hess, J.M.Polt: "Pupil size as related to interest value of visual stimuli", *Science*, No.132, 1960, pp.349-350.
- [5] E.H.Hess, J.M.Polt: "Pupil size in relation to mental activity during simple problem solving", *Science*, No.143, 1964, pp.1190-1192.
- [6] A.Paivio, H.M.Simpton: "The effect of word abstractness and pleasantness on pupil size during an imagery task", *Psychonomic Science*, No.5, 1966, pp.55-56.
- [7] G.Hakerem, S.Sutton: "Pupillary response at visual threshold", *Nature*, No.212, 1966, pp.485-486.
- [8] 樋渡涓二: 「人間情報工学」, コロナ社, 1979, 3.4 節.
- [9] J.Hassett, 平井久ほか訳: 「精神生理学入門」, 東京大学出版会, 1987, 第7章.
- [10] 佐々木力、石井威望、広瀬通孝: 「計算機のソフトウェアに関するメンタルモデルの基礎研究」, *Human Interface News and Report*, Vol.2, No.3, 1987.
- [11] P.Billingsley: "Ergodic Theory and Information", J.Wiley & Sons, 1965, Chapter 7.
- [12] K.A.Ericsson, H.A.Simon: "Verbal Report as Data", *Psychological Review*, Vol.87, 1980, pp.215-251.
- [13] K.T.Spoehr, S.T.Lehmkule, 荻阪直行ほか訳: 「視覚の情報処理」, サイエンス社, 1986, 第9章.
- [14] ナック: 「アイマークレコーダ モデルV 取扱説明書」, ナック, 1986.
- [15] ナック: 「EMR-V データアウトプットユニット V-99B 取扱説明書」, ナック, 1986.

6章 結論

本研究では、人間と機械の接点となるヒューマンインタフェース設計法の高度化について、人間の認知情報処理活動に関する知見である認知工学に着目し、具体的なシステムの事例を取りあげてヒューマンインタフェースを構築した。また、より高度なヒューマンインタフェースである相互適応型インタフェースの構成を提案し、その基礎技術である人間情報行動計測技術に関する基礎実験を行った。

2章では、研究の背景として、近年の高度情報処理社会での人と機械の関係が抱える諸問題を明らかにし、人間－機械の最適な交流形態を実現するためのヒューマンインタフェース技術の高度化について展望した。最初に、人間の認知活動に関する認知科学の知見の工学的応用を指向する「認知工学」を、ヒューマンインタフェース構築への適用の観点から整理した。認知工学の分野では、各種のモデルや概念が提唱されており、ヒューマンインタフェース設計には、その問題に合わせて適切なモデルを選択し設計を進めていくことが重要である。次に、この認知工学に基づきヒューマンインタフェースを実際に構築する際に用いる各種コンピュータ技術について述べ、その特徴と適用方法についてまとめた。そして最後に、本研究の目的、着眼点、および実際に行った研究の範囲について述べた。

3章では、原子炉プラントのシミュレーションプログラムを自動生成するモジュール統合型シミュレーションシステム(MSS)に関して、認知工学の観点からそのヒューマンインタフェースを設計・構築し、試行例からその有効性を検討した。はじめに、MSSの基本的な方法と構成を説明し、そのヒューマンインタフェースを構築する際のアプローチの方法について述べた。MSSでシミュレーションを行う際には、シミュレーションプログラムの開発、およびシミュレーションの実行の2つの作業が必要であり、それぞれの作業を対象として、プログラム開発支援インタフェース SESS-1、シミュレーション実行支援インタフェース SESS-2を構築した。SESS-1は、MSSでのプログラム開発に必要な HDL 記述リストを対話型操作により自動生成する CRT ベースのインタフェース CRTS と、引数の結線状態を確認・修正するカラーグラフィック端末ベースの CGKS から構成される。一方、SESS-2は、AI 技術を用いてシミュレーション実行に必要な各種の情報を知識ベース化し、その知識を用いて引数結線の意味論的診断、および数値入力データの作成を支援する。また、SESS-1、SESS-2 について具体的な作業例として LMFBR 1 次系の核熱流動特性の解析を取り上げ、その試行例から有効性を確認した。

4章では、宇宙用原子炉の概念設計を対象として、そのヒューマンインタフェースを含んだ設計支援環境の構築について述べた。はじめに、宇宙用原子炉の概念設計に関してその概念モデルを概説し、概念設計に必要な作業、および認知工学に基づいたヒューマンインタフェース構築のアプローチについて述べた。この問題に関しては、操作性と協調作業という2つの観点から2つの支援環境を構築した。仮想現実感を応用した概念設計支援環境 VINDS は、未だ存在しない宇宙用原子炉に関してその構造や機能構成の理解の促進と工学解析計算の支援を目的として構築した。その際には、仮想現実感の特徴を最大限に生かして、仮想空間内に実体構造や機能を系統立てて階層的に表現し、設計者の直観的理解と直接操作を実現している。また、解析計算の際にも、パラメータの設定・シミュレーションの実行・結果の表示をすべて仮想空間内で行えるようにしている。一方、WWW を応用した非同期分散型設計支援環境 WINDS は、仮想現実感の特徴である直接操作は実現できていないものの、VINDS と同等の機能を有し、さらに遠隔地に点在している複数の設計者が協同で設計作業を進めることができる支援環境を構築した。協同作業の支援では、設計情報の共有をはじめ、掲示板、在席管理、ニュースシステムによる作業状況管理などの情報の一元管理と意見交換の機能を実現している。また、解析計算結果について

は、それらをデータベース化し、類似性検索や注釈による検索機能などで計算結果の再利用を図っている。さらに、これら2つの支援環境について操作例を挙げてその効果を検討した。

5章では、高度なヒューマンインタフェースである相互適応型インタフェース技術の確立を目指して人間情報行動計測技術に関する基礎実験を行い、その方法と結果およびその考察について述べた。具体的には、ヒューマンインタフェースにおける人間の認知情報処理行動を模擬し、状態遷移モデルを用いた学習と判別に関する認知タスクをコンピュータ画面との対話で遂行させる被験者実験を行った。その際、被験者の認知情報行動特性の分析への適用性を検討した。測定したデータは、操作記録、発話記録、瞳孔径、眼球運動、瞬目、心拍、皮膚電位反応、顔面温度など多岐にわたり、そのデータ量も膨大となるため、データ処理分析の効率化・総合化に努めた。特に、ここでは視覚系指標に着目し、リアルタイム計測のための装置を開発した。また、多角的なデータを総合分析するために、分析に用いる指標の時間系列変化を同一時間軸でグラフ化したタイムラインチャートを用いた。実験から得られたデータに関しては、(1)問題解決方策、(2)認知課題の主観的な難易度の解釈、(3)問題解決時のメンタルイメージとその効果、(4)ストレス時の認知行動、(5)眼球のサッケード運動、(6)注視、(7)瞳孔反応、(8)瞬目、(9)皮膚電位反応、(10)心拍率、の観点から分析し、結果について検討した。さらに、分析から得られた知見をもとに問題解決における認知行動の詳細を追跡する手法として、各種の生理指標と発話記録、操作記録をタイムライン表示し、分析する方法を提案し、例を用いてその有効性を示した。

以上、本研究では、人間と機械との接点となるヒューマンインタフェースについて、人間側の行動に着目し認知工学に基づいてその設計方法の高度化を行った。また、さらに人間の内面状態を把握することによって人間と機械が相互に協調する相互適応型インタフェース実現を目指して人間情報行動計測技術に関する基礎実験を行った。

相互適応型インタフェースは、「使いやすい」機械システムを実現するためのインタフェースとして期待できるが、人間を対象としているだけに新たな問題点がでてくる可能性がある。現時点で予想できるものは、(1)操作者の内面や状態を推測するため、その人のプライバシーが侵害されるおそれがある、(2)機械システムを操作する際、操作者の状態によって機械側の対応が異なるため、操作者側の頭の中にメンタルモデルを形成しにくい、の2点が考えられる。(1)に関しては、操作者本人に同意をとる、推定した内面状態を機械システム操作の目的以外に使用しない等の法的規制や社会的同意が必要となるであろう。一方、(2)の問題に関しては、操作者が対峙するインタフェースを「擬人化」し、操作者と機械システムの交流形態を人間同士のコミュニケーションに近いものとするのが考えられる。すなわち、従来のインタフェースでは、操作者が機械システムに対して操作を行うことでメンタルモデルを形成しており、機械システムが、同じ局面で同じ操作をすると同じ結果が得られることが前提となっている。しかし、相互適応型インタフェースの場合には、同じ局面で同じ操作をしても、操作者の内面状態によっては同じ結果が得られるとは限らない。これは、人間同士のコミュニケーションにおいて、人間が相手の状態によって態度を変えることによく似ている。そのため、インタフェースの中に「仮想の人間」を創り出すことによって、人間同士のコミュニケーションを模擬し、機械システムの対応が場合によって変化しても操作者に違和感を抱かせないようにすることができると考えられる。

今後は、上記のような問題点や技術的な問題点を考慮し、相互適応型インタフェース実現に向けて、以下のような課題が挙げられる。

- 顔表情から情動変化を推定する手法の研究
- リアルタイムでの発話分析から認知過程を推定する手法の研究

- 多角的な人間情報行動計測データから総合的に内面状態を推定する手法の確立
- 相互適応型インタフェースに適した内面状態の利用法
- 内面状態に適合した最適情報を提示する技術の確立
- 内面状態に適合した機械システムと人間とのタスク分配法の開発
- 人間同士のコミュニケーションを模擬するインタフェース手法の検討

これらの課題は、どれも人間を対象とした基礎実験や評価実験が必要なため、被験者の個人差や体調に左右されず、安定して実験が行えるような手法の検討も必要になってくる。

謝 辞

本研究は、著者が京都大学に在学していた時から、榊島津製作所に入社し、さらに大学の助手として着任し現在に至るまでに行った研究を中心に、京都大学大学院エネルギー科学研究科吉川榮和教授のご指導のもとに纏めたものであります。吉川榮和先生は、著者が大学、大学院時代には研究の方向性や進め方から卒業論文、修士論文の書き方に至るまで全ての研究活動に対してご指導をいただき、さらに、再び助手として京都大学に着任し現在に至るまで、公私にわたってご指導とご鞭撻を賜りました。特に、本論文に纏めた研究や本論文の執筆に関して、大変お忙しい中にも関わらず、始終適切で細やかな熱意あふれるご指導を賜りました。ここに深甚なる感謝の意を表する次第であります。また、査読にあたり、適切なご指導とご助言を頂きました京都大学大学院工学研究科、田丸啓吉先生、英保茂先生、および関係諸先生方に対しましても深く感謝の意を表します。

本研究の実施にあたりましては、長年にわたり多くの方々からご厚情あふれるご支援、ご協力、ご激励を頂きました。また、本研究は、ヒューマンインタフェースという人間に関するもので、その実施には、著者だけでなく多くの方々の熱意と努力によって支えられてきたものであります。

京都大学若林二郎名誉教授には、著者が京都大学工学部から工学研究科修士課程在学中に、本研究の基礎となるヒューマンファクタだけでなく広く学問に対する取り組み方をご指導賜りました。また、その後も研究を進めるにあたり、ご厚情あふれるご激励、ご指導、ご鞭撻を賜りました。深く感謝の意を表します。

京都大学大学院エネルギー科学研究科、手塚哲央助教授には、著者が助手に着任して以来、研究だけでなく助手という仕事に関して不慣れな著者にいろいろとご指導を頂きました。深く感謝の意を表します。

岡山大学工学部システム工学科、五福明夫助教授は、著者が京都大学工学部から工学研究科修士課程在学中に研究室の助手と在任しておられ、研究に関して何かとご意見やご助言を頂きました。特に、五福先生は、著者が学生のときに研究から私生活に至るまで、いろいろと相談に乗っていただきました。心から感謝申し上げます。

東北大学大学院工学研究科、高橋信博士は、著者が助手として着任する以前に本研究室に助手として在任しておられ、原子炉プラント、ヒューマンファクタ、人間情報行動計測技術など本研究を進めるにあたり数多くのご意見やご助言を頂きました。また、よき先輩として公私にわたり適切なアドバイスを頂きました。ここに厚くお礼申し上げます。

最後になりましたが、本研究を進めるにあたり、ご協力を頂きました谷友美さんをはじめとする研究室のスタッフの方々、学生の方々、被験者の方々をはじめ、ご協力いただいた方々に深く感謝いたします。

末尾ながら、家庭にあっても、精神的にサポートしてくれた妻の美砂や長男の悠元ほか家族にも深く感謝いたします。

図表リスト

第2章

図 2-1	社会における人間と機械システムの関係	2
図 2-2	インタフェース技術を構成する要素技術	3
図 2-3	CSCW 技術を構成する要素技術	4
図 2-4	相互適応型インタフェースの枠組み	5
図 2-5	相互適応型インタフェースの要素技術	5
図 2-6	認知科学の情報处理的アプローチ	6
図 2-7	実行の淵と評価の淵の間の橋 (D.A.Norman による)	7
図 2-8	物理システムの機能的特性を対象とした抽象度の階層的表現(J.Rasmussen による)	8
図 2-9	人間の情報処理過程のモデル	8
図 2-10	ヒューマンパフォーマンスモデル (S.K.Card らによる)	9
図 2-11	人間の行動モデルとヒューマンエラーの関係(J.Rasmussen による)	10
図 2-12	納得世界の構造(M.Lampert による)	11
図 2-13	エキスパートシステムの構造	14
図 2-14	エキスパートシステムの前向き推論と後向き推論	14
図 2-15	VR 環境の基本構成	16
図 2-16	WWW サーバとクライアント間の通信	18
図 2-17	人間情報行動計測における計測指標	19
表 2-1	ヒューマンエラーの分類	9
表 2-2	認知工学のモデルとヒューマンインタフェースへの適用	12
表 2-3	エキスパートシステムの問題パターン	15
表 2-4	各種要素技術とヒューマンインタフェースへの適用	19

第3章

図 3-1	モジュール統合型シミュレーションシステムのソフトウェア構成	26
図 3-2	モジュールデータベースでのモジュール名と引数名に付随する情報の分類	29
図 3-3	プラント構成要素の観点から分類されたキーワード設定・検索用メニュー画面	30
図 3-4	モジュール統合用プレコンパイラ HTSC への簡易言語記述 (HDL 記述リスト) のブロック構成	31
図 3-5	モジュール統合型シミュレーションシステムのプログラム開発支援ヒューマンインタフェース SESS-1 の全体構成	36
図 3-6	モジュール結合によるプログラム開発の手順	36
図 3-7	SESS-1 によるプログラム開発の手順	38
図 3-8	CRTS の自動結線の処理を選択するメニュー画面	38
図 3-9	CRTS での引数結線を設定するメニュー画面 (置換関係)	39

図 3-10 CGKS での引数結線を設定するグラフ表示画面 (相等関係)	40
図 3-11 SESS-2 での各種知識ベースと知識処理の流れ図	43
図 3-12(a)、(b) モジュールデータベースの全体フレームおよび 4 つの Argument サブフレームの構成	45
図 3-13 物性値フレームの構成	46
図 3-14 物性値フレームの具体例	46
図 3-15(a)、(b) プログラムフレームの全体フレーム、および 4 つの Argument サブフレームの構成	47
図 3-16 原子炉フレームの構造	48
図 3-17 結線の妥当性の意味論的診断処理の流れ図	49
図 3-18 疑わしい結線についての診断結果の出力リスト例	52
図 3-19(a)、(b) 数値入力データの自動設定の方法	53
図 3-20 数値入力データ設定支援システムの構成と知識処理の流れ図	55
図 3-21 Smalltalk-80 による数値入力データ設定のマルチウィンドウ画面の一例	58

表 3-1 静的、動的モデルの諸変数とモジュール引数の分類との対応	28
表 3-2 プログラム開発支援インタフェース SESS-1 構築のアプローチ	33
表 3-3 シミュレーション実行支援インタフェース SESS-2 構築のアプローチ	34
表 3-4 SESS-1 による LMFBR 1 次系熱流動特性解析プログラム作成時の所要時間	41
表 3-5 意味診断における単位照合の事例	50
表 3-6 意味診断における引数の物理的意味の説明文の照合と評価点の事例	51
表 3-7 数値設定支援の試行例における各 Phase の作業時間	57

第 4 章

図 4-1 大規模工学システム の概念設計モデル	62
図 4-2 宇宙用原子炉全体システム の概念図	63
図 4-3 宇宙用原子炉の炉心部	64
図 4-4 TFE ピン構成の概念図	65
図 4-5 1/8 円周の TFE セル構成の概念図	65
図 4-6 回転制御ドラム の構成	66
図 4-7 エミッタとコレクタ間の熱電子発電効果のモデル図	67
図 4-8 炉心 r-z 2 次元拡散系の体系	68
図 4-9 TFE 計算と SRAC との関係	70
図 4-10 複合収束計算全体の流れ	71
図 4-11 収束計算のための関数の詳細	72
図 4-12 立体視の仕組み	77
図 4-13 実体構造-機能一対一対応の知識の階層構造	81
図 4-14 VINDS システムの全体構成	82

図 4-15	入出力データを持ったオブジェクトの中身	83
図 4-16	G2 における入出力データを持ったオブジェクト	83
図 4-17	物質の融点、沸点を含んだオブジェクト	83
図 4-18	冷却材、燃料温度に関するルール	84
図 4-19	仮想現実感環境のハードウェア構成	85
図 4-20	VINDS による概念設計作業風景	86
図 4-21	仮想空間内に表示される”手”	86
図 4-22	VINDS システムのメニュー画面	86
図 4-23	Structural World の画面	87
図 4-24	Structural World で部品を手を持っている画面	88
図 4-25	Structural World で部品の取り外しを行った画面	88
図 4-26	Functional World の画面	89
図 4-27	Functional World 内で部品の機能を表示する画面	89
図 4-28	Analysis World の画面	90
図 4-29	Analysis World 内で変更可能なパラメータを表示した画面	90
図 4-30	冷却材の種類を選択する画面	91
図 4-31	TFE ピンの列数を選択する画面	91
図 4-32	TFE セルの形状を変更する画面	92
図 4-33	炉心 r-z 形状を変更する画面	92
図 4-34	冷却材の流速を変更する画面	93
図 4-35	TFE 計算で変更可能なパラメータを示した画面	93
図 4-36	SRAC 計算で変更可能なパラメータを示した画面	94
図 4-37	複合収束計算の結果	94
図 4-38	協同設計作業の概念図	96
図 4-39	WINDS システム構成	105
図 4-40	WINDS の開始画面	109
図 4-41	WINDS の受付完了の画面	110
図 4-42	掲示板の画面	110
図 4-43	WINDS のメニュー画面	111
図 4-44	ニュースにおける記事の一覧の画面	111
図 4-45	ニュースにおける返信記事記載の画面	112
図 4-46	在席管理の画面	113
図 4-47	構成部品関連支援環境の初期画面	114
図 4-48	TFE に関する情報提供の画面	115
図 4-49	VRML 形式での 3 次元モデルの表示画面	116
図 4-50	外部部品が取り除かれる様子(1)	116
図 4-51	外部部品が取り除かれる様子(2)	117
図 4-52	外部部品が取り除かれる様子(3)	117
図 4-53	ベッセルドラムの 3 次元モデルの表示画面	117

図 4-54	SRAC 解析の実行画面	118
図 4-55	TFE 計算の結果表示画面	120
図 4-56	SRAC の結果表示画面	121
図 4-57	SRAC の結果表示における変化	121
図 4-58	回転制御ドラムの吸収体が外側の時の炉心内熱出力密度分布の 3 次元グラフ画面	122
図 4-59	複合収束計算の結果表示画面	123
図 4-60	事例表示の画面	124
図 4-61	類似性検索の入力画面	125
図 4-62	類似性検索の結果表示画面	126
図 4-63	設計への注釈付けの画面	127
図 4-64	設計への注釈による検索入力画面	128
図 4-65	注釈による検索結果表示画面	129
図 4-66	WINDS を利用した設計作業の流れ	130
表 4-1	概念設計における基本設計モデル	62
表 4-2	宇宙用原子炉の設計概念	63
表 4-3	TFE 計算に必要なパラメータ	67
表 4-4	SRAC に必要なパラメータ	70
表 4-5	複合計算に必要なパラメータ	72
表 4-6	TFE 計算から得られた最適設計知識	74
表 4-7	仮想空間を応用した概念設計支援環境 WINDS 構築のアプローチ	75
表 4-8	WWW を応用した非同期分散型協同設計支援環境 WINDS 構築のアプローチ	76
表 4-9	複合収束計算の入力パラメータの概略値	102
表 4-10	解析計算結果から得られた知識	102
表 4-11	知識を適用した特徴付け(1)	103
表 4-12	知識を適用した特徴付け(2)	103
表 4-13	知識を適用した特徴付け(3)	103
表 4-14	工学解析計算の結果一覧	119

第 5 章

図 5-1	神経系の主な区分	134
図 5-2	状態遷移モデルの図と状態遷移表	137
図 5-3	3 つの入力値による状態遷移先が全て異なるもの	138
図 5-4	3 つの入力値のうち、2 つの入力による遷移先が現在の状態と同じもの	138
図 5-5	研究で用いる状態遷移モデルの構造とエントロピ	139
図 5-6	実験 1 「学習」課題での問題提示画面	140
図 5-7	ある状態に遷移しないモデルの例	141
図 5-8	実験 2 「判別」課題での問題提示画面	142

図 5-9	実験 3 で提示されるサンプル図の例	142
図 5-10	認知心理実験時のシステム構成	143
図 5-11	アイマークレコーダ	145
図 5-12	アイマークレコーダによる視点位置計測の原理	145
図 5-13	アイマークレコーダで撮影された瞳孔像	147
図 5-14	瞳孔面積測定のためのウィンドウ設定	147
図 5-15	二値化の状態やウィンドウ位置を確認するためのモニタ画像	149
図 5-16	実験データ解析時のシステム構成	150
図 5-17	実験で得られた各種のデータのタイムライン表示	152
図 5-18	実験 1 における問題のエントロピと回答時間の関係	154
図 5-19	実験 1 における問題のエントロピと回答時間の関係（モデル図提示前と提示後）	154
図 5-20	状態遷移モデルに含まれる各種のパタン	155
図 5-21	モデルに含まれるパタン数と回答時間の関係	156
図 5-22	状態遷移回数表とそのモデルの構造	157
図 5-23	難易度の指標 B_2 と回答に要した遷移数の関係	158
図 5-24	モデル間の類似度の算出	159
図 5-25	難易度の指標 D_2 と回答に要した遷移数の関係	160
図 5-26	実験 3 における類似度が高いサンプル	160
図 5-27	実験 2、問題 32 のサンプル	161
図 5-28	判別の手懸かりとなる遷移と視点の位置を表すタイミングチャート	162
図 5-29	回答までに出現した手懸かりとなる遷移数に対する正解を判別するまでに出現した遷移数の比率（実験 2、入力時間間隔 1 秒）	165
図 5-30	回答までに出現した手懸かりとなる遷移数に対する正解を判別するまでに出現した遷移数の比率（実験 2、入力時間間隔 2 秒）	166
図 5-31	回答までに出現した手懸かりとなる遷移数に対する正解を判別するまでに出現した遷移数の比率（実験 2、入力時間間隔 3 秒）	166
図 5-32	実験 1、問題 2 の終了時に被験者が描いた回答図と正解の状態遷移図	167
図 5-33	実験 1、問題 11 の終了時に被験者が描いた回答図と正解の状態遷移図	167
図 5-34	視点の移動速度分布（実験 1）	170
図 5-35	視点の移動速度分布（実験 2、入力時間間隔 1 秒）	171
図 5-36	視点の移動速度分布（実験 2、入力時間間隔 2 秒）	171
図 5-37	視点の移動速度分布（実験 2、入力時間間隔 3 秒）	172
図 5-38	視点の移動速度分布（実験 3）	172
図 5-39	各実験における注視時間の頻度分布	174
図 5-40	長時間の注視のあった問題のタイミングチャート	175
図 5-41	実験 2、問題 16 で得られた各種のデータのタイムライン表示	176
図 5-42	実験 2、問題 16 のサンプル	176
図 5-43	長時間の注視がなかった問題のタイミングチャート	177
図 5-44	瞬目時に瞳孔面積測定装置で得られる波形	179

図 5-45	瞬目間隔の分布 (実験 1)	179
図 5-46	瞬目間隔の分布 (実験 2)	180
図 5-47	瞬目間隔の分布 (実験 3)	180
図 5-48	瞬目間隔の分布 (実験 2、入力時間間隔 1 秒)	181
図 5-49	瞬目間隔の分布 (実験 2、入力時間間隔 2 秒)	181
図 5-50	瞬目間隔の分布 (実験 2、入力時間間隔 3 秒)	182
図 5-51	問題ごとの平均心拍率	184
図 5-52	実験で得られた各種データのタイムライン表示	185
図 5-53	実験 2、問題 14 のサンプル	185
表 5-1	I/O ポートアドレスとデータの種類	150
表 5-2	判別の手懸かりとなる遷移の出現 (実験 2、入力間隔 1 秒)	164
表 5-3	判別の手懸かりとなる遷移の出現 (実験 2、入力間隔 2 秒)	164
表 5-4	判別の手懸かりとなる遷移の出現 (実験 2、入力間隔 3 秒)	165
表 5-5	ストレスを与える問題の実験結果	168
表 5-6	実験 2 における回答時間の長くかかった問題とサッケード運動の比率	173
表 5-7	実験 2 における回答時間の短かった問題とサッケード運動の比率	173
表 5-8	実験 2 における 3 秒以上の注視の頻度	175

発表論文リスト

第3章

原著論文

- (1) 吉川榮和、水谷直樹、下田宏、若林二郎、モジュール統合型シミュレーションシステムへのシミュレーション実行支援用知的インタフェースの開発、日本原子力学会誌、30, 802-814 (1988).

口頭発表

- (1) 下田宏、水谷直樹、吉川榮和、若林二郎、モジュール統合型シミュレーションシステムへの知識処理の適用、日本原子力学会 昭和 62 年秋の大会予稿集、G17,(1987).
- (2) 引間寿夫、下田宏、吉川榮和、若林二郎、モジュール統合型シミュレーションシステムの新ハイブリッドシミュレーションへの発展、日本原子力学会 昭和 62 年秋の大会予稿集、G18,(1987).
- (3) 下田宏、水谷直樹、吉川榮和、若林二郎、モジュール統合型シミュレーションシステムへの知識処理を用いたユーザインタフェースの開発、計測自動制御学会第 3 回ヒューマンインタフェースシンポジウム論文集、355、(1987).
- (4) 吉川榮和、若林二郎、引間寿夫、下田宏、原子力プラントのモジュール統合型シミュレーションシステムー新ハイブリッドシミュレーションへの発展、日本自動制御協会 第 1 回インテリジェント FA シンポジウム講演論文集、63、(1987).

第4章

国際会議議事録

- (1) H.Shimoda, M.Takahashi, T.Nagamatsu, S.Takeoka, H.Yoshikawa: A New VR-Based CSCW Environment for Conceptual Design of a Space Power Reactor, Proceedings of CSEPC96, Kyoto, Japan, November 12-15, (1996).
- (2) H.Shimoda, H.Yoshikawa, T.Nagamatsu, S.Takeoka: Integrated Design Support Systems for Conceptual Design of A Space Power Reactor, (In preparation, to be presented at IASTED, Grand Bahama Island, The Bahamas, December 8-10, 1997).

口頭発表

- (1) 吉川榮和、武岡智、長松隆、高橋信、下田宏、宇宙用原子炉の概念設計を対象とした仮想現実感による統合型設計支援環境 VINDS の構築、日本原子力学会 第 35 回春の年会要旨集第 II 分冊、329 (1997).
- (2) 下田宏、武岡智、吉川榮和、宇宙用原子炉の概念設計を対象とした非同期分散型 CSCW 環境 WINDS の開発、日本原子力学会 第 35 回春の年会要旨集第 II 分冊、330 (1997).

第5章

原著論文

- (1) 吉川榮和、下田宏、長井義典、小島真一、マンマシンインタフェースにおける人間のオンライン認知情報処理特性に関する基礎実験研究、システム制御情報学会、3, 261-276 (1990). (平成4年5月20日 システム制御情報学会 榎本記念論文賞受賞)
- (2) H.Yoshikawa, H.Shimoda, Y.Nagai, S.Kojima, K.Inoue: An Experimental Study on Human Cognitives at Man-Machine Interface, Automatic Control World Congress, 10, 'In the Service of Mankind'(Eds.U.Jaaksoo, V.I.Utkin), 5, Pergamon Press, 449-453 (1990).
- (3) H.Yoshikawa, H.Shimoda, O.Wakamori, Y.Nagai: A Basic Experimental Study on Mental Workload for Human Cognitive Work at Man-Machine Interface, Symbiosis of Human and Artifact, (Eds. Y Anzai, K. Ogawa and H.Mori), Elsevier Science B.V., 853-858 (1995).
- (4) H.Yoshikawa, H.Shimoda, O.Wakamori, Y.Nagai: A Basic Experimental Study on Mental Workload for Human Cognitive Work at Man-Machine Interface, Technical Reports of the Institute of Atomic Energy Kyoto University, Report No.215, March 1995.

国際会議議事録

- (1) H.Yoshikawa, S.Maeda, H.Shimoda, J.Wakabayashi: A Basic Experimental Study on Generic Human Cognitive Behavior Using State Transition Model, Proceedings of 7th European Annual Conference on Human Decision Making and Manual Control, October18-20, Paris, France, 230-235 (1988).
- (2) H.Yoshikawa, H.Shimoda, Y.Nagai, S.Kojima, K.Inoue: An Experimental Study on Human Cognitives at Man-Machine Interface, Preprints 11th IFAC World Congress, Tallinn, Estonia, USSR, August 13-17, Vol.10, 194-198 (1990).
- (3) H.Yoshikawa, H.Shimoda, S.Kojima, N.Nagai, T.Nishio: Implications for Man-Machine Interface Designings from the Findings of Basic Laboratory Experiments on Human Cognitives, Proceedings of 1990 Korean Automatic Control Conference, Seoul, Korea, October 26-27, 1990, Vol.2, 1430-1435 (1990).

口頭発表

- (1) 下田宏、前田伸吾、吉川榮和、若林二郎、状態遷移モデルを用いた認知心理実験の試み、日本原子力学会 昭和63年秋の大会予稿集、第1分冊、A34 (1988).
- (2) 吉川榮和、前田伸吾、下田宏、若林二郎、状態遷移モデルを用いた認知心理実験の試み、第32回システムと制御研究発表講演会講演論文集、229-230 (1988).
- (3) 吉川榮和、下田宏、前田伸吾、アイマークレコーダを用いた認知心理実験の試み、計測自動制御学会 第4回ヒューマンインタフェースシンポジウム論文集、99-104(1988).
- (4) 吉川榮和、下田宏、長井義典、井上欣也、小島真一、状態遷移モデルを用いた認知心理実験、(1) アイマークレコーダデータの分析、第33回システムと制御研究発表講演会講演論文集、279-280 (1989).
- (5) 長井義典、井上欣也、下田宏、吉川榮和、小島真一、状態遷移モデルを用いた認知心理実験、(2)

- 多用途脳波計データの分析、第 33 回システムと制御研究発表講演会講演論文集、281-282 (1989).
- (6) 小島真一、吉川榮和、下田宏、長井義典、井上欣也、状態遷移モデルを用いた認知心理実験、(3) 発話分析法の検討、第 33 回システムと制御研究発表講演会講演論文集、283-284 (1989).
- (7) 長井義典、井上欣也、下田宏、小島真一、吉川榮和、心理生理的測定を用いた基礎認知心理実験、計測自動制御学会第 5 回ヒューマンインタフェースシンポジウム論文集、273-278 (1989).
- (8) 小島真一、井上欣也、下田宏、長井義典、吉川榮和、基礎認知心理実験の計算機による発話分析の研究、計測自動制御学会 第 5 回ヒューマンインタフェースシンポジウム論文集、279-284 (1989).
- (9) 吉川榮和、長井義典、小島真一、下田宏、認知心理実験における心理生理特性の適用性検討、日本原子力学会 1990 年会要旨集、A4,4 (1990).

その他

口頭発表

- (1) 荻本浩三、下田宏、杉本武和、プログラム部品合成システム、情報処理学会ソフトウェア工学研究会 69-74, 77-SE-12, (1991) .
- (2) 下田宏、山崎一成、藤田明德、梶原茂樹、河野和宏、スプライン関数による MR 画像の補間拡大、日本医用画像工学会第 10 回大会予稿集, 43 (1991) .
- (3) 下田宏、山崎一成、藤田明德、梶原茂樹、河野和宏、スプライン関数による MR 画像の補間拡大法の評価、第 18 回日本磁気共鳴医学会講演抄録集, 223 (1991).
- (4) 下田宏、山下義徳、山崎一成、藤田明德、最大値投影 MR アンギオ画像の画質改善、第 19 回日本磁気共鳴医学会講演抄録集, 101 (1992).
- (5) 山下義徳、下田宏、西村直二郎、山崎一成、藤田明德、MR アンギオグラフィ画像投影法、第 19 回日本磁気共鳴医学会講演抄録集, 102 (1992).
- (6) 安藤彰英、下田宏、山崎一成、藤田明德、輝度不均一画像自己補正法の評価、第 21 回日本磁気共鳴医学会講演抄録集, 229 (1993).
- (7) 川崎浩嗣、井上信介、下田宏、藤田明德、ニューラルネットワークを用いた表示ウィンドウの自動設定 (第 2 報)、第 23 回日本磁気共鳴医学会講演抄録集 P-1 (1995).
- (8) 下田宏、飯島直人、藤田明德、頭部 OM ラインの自動設定、第 23 回日本磁気共鳴医学会講演抄録集 P-2 (1995).
- (9) 巫文芬、吉川榮和、高橋信、下田宏、原子炉基礎原理教育のための VR を応用した可視化とマルチモーダルティーチング、第 5 回計測時動制御学会中国支部学術講演会論文集、94-95 (1996).
- (10) 大林史明、石村英樹、下田宏、吉川榮和、インターネットを用いた教育環境の構築と評価、計測自動制御学会 第 44 回ヒューマンインタフェース研究会資料、319-324 (1997).
- (11) 二階堂義明、下田宏、高橋信、吉川榮和、WWW を用いた CAI システムの構築と評価実験、計測自動制御学会 第 44 回ヒューマンインタフェース研究会資料、325-332 (1997).
- (12) 梅田直樹、小澤尚久、下田宏、吉川榮和、音声認識装置を用いた認知過程推定法の検討、計測自動制御学会 第 44 回ヒューマンインタフェース研究会資料、333-340 (1997).
- (13) 國弘威、下田宏、吉川榮和、動的表情認識に関する基礎研究、計測自動制御学会 第 44 回ヒューマンインタフェース研究会資料、349-356 (1997).

認知工学に基づくヒューマンインタフェース設計法の高度化に関する研究

付 録

付録A SESS-1 の機能検証：LMFBR 1 次系の熱流動過渡解析

SESS-1 の総合的なプラント解析機能を確認するため、定格出力約 380MW のループ型 LMFBR プラントの 1 次系熱流動過渡解析を試行した。対象とする LMFBR プラントの主要計算条件を表 A-1 に示す。

表 A-1 LMFBR 1 次系熱過渡解析の主要計算条件

原子炉炉心核熱流力特性

1 点近似核動特性モデル

(遅発中性子 6 組、即発跳躍近似)

即発中性子寿命	$4.2516 \times 10^{-7} \text{ s}$
全即発中性子割合	$0.00355 \Delta k/k$
FP 残留熱割合 (定常)	0.06929
(崩壊グループ 11 組 ANS 基準値)	
炉心 2 チャンネル近似 (同一条件)	
燃料ペレット材 (混合酸化物)	半径 0.245745 cm
被覆材 (ステンレス鋼)	厚さ 0.0381 cm
燃料棒長さ	168 cm
軸方向出力分布	正弦波状
チャンネル当り Na の冷却剤質量流率	$243.2 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}$
入口／出口温度 (定常)	$400^\circ\text{C} / 546.95^\circ\text{C}$
炉心バイパス部発熱比	全炉心発熱量の 0.1%
流量比	全炉心流量の 5.0%
出口温度 (定常)	469.88°C

原子炉プラント条件

原子炉プラント構造材	ステンレス鋼
原子炉全流量 (定常)	2 t/s
原子炉入口／出口温度 (定常)	$400.0^\circ\text{C} / 543.1^\circ\text{C}$
下部プレナム 全容積	2.34 m^3
上部プレナム 初期冷却材容積	150 m^3
初期 Ar カバーガス容積／重量	$50 \text{ m}^3 / 14.24 \text{ kg}$
上部プレナム全高	4.0 m
チムニー高さ	0.8 m
出口配管部高さ	2.5 m
1 次系配管 (高、低温共) 内径／長さ	$0.5 \text{ m} / 20 \text{ m}$
中間熱交換器 全伝熱面積 1 次／2 次側	$753.98 \text{ m}^2 / 691.15 \text{ m}^2$
全容積 1 次／2 次側	$17.59 \text{ m}^3 / 19.00 \text{ m}^3$
1 次系ポンプ モータトルク (定格)	$1.077 \times 10^8 \text{ rad} \cdot \text{g} \cdot \text{cm}^2 / \text{s}$
インペラ角速度 (定格)	15.5 rad/s
ポンプ慣性	$7.085 \times 10^8 \text{ g} \cdot \text{cm}$
定格流量	2 t/s
定格吐出圧 (Na 高)	6 m

この計算では 1 次流量の低下に伴う 1 次系全体としての熱流動過渡のうち、特に原子炉容器内で複雑

な構造をしている上部プレナム部の温度成層化の影響の検討を主眼として述べる。

本解析で用いた上部プレナムモデルの概念図を図 A-1に示す。上部プレナム部では炉心からチムニーを経てプレナムに噴出する流れの浸透高さの時間変化 $Z_j(t)$ によって、プレナム内の Na 冷却材温度が異なる領域 A と B に分離される可能性がある。この効果を「温度成層化」というが、これによりプレナム内の構造および出口ノズルを経て高温出口配管に至る部分の温度過渡による熱衝撃の影響を検討する。

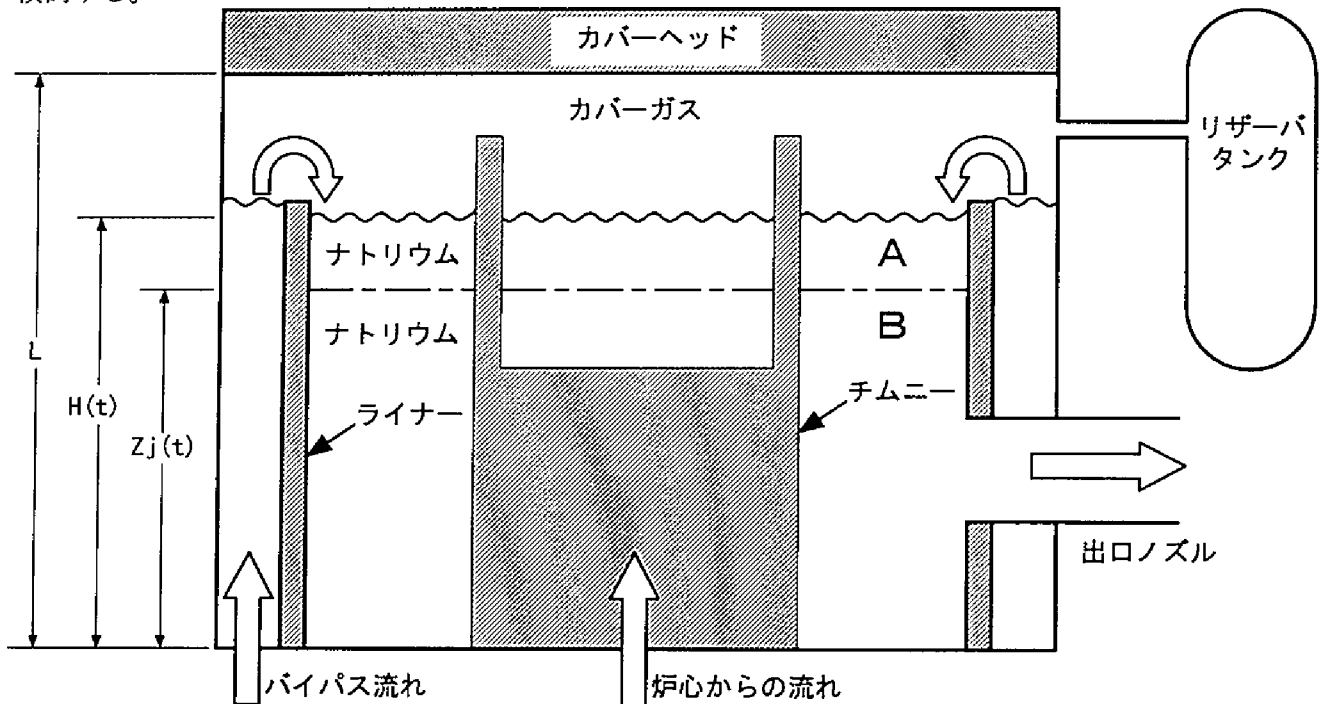


図 A-1 LMFBR 上部プレナムモデルの概念図

本計算では、噴出流の浸透高さ Z_j は Yang^[1]により次の (A-1) 式を用いる。

$$Z_j = (1.0484 F_r^{0.785}) r_0 + Z_{ch} \quad (A-1)$$

$$F_r = \left(\frac{W_c}{\pi r_0^2 \rho_c} \right)^2 \frac{\rho_B}{g r_0 (\rho_c - \rho_B)} \quad (A-2)$$

ただし、
 r_0 : 吹き出し部半径
 g : 重力加速度、
 ρ : 密度、
 W_c : 噴出流量、
 Z_{ch} : チムニー高さ

添字 B、C は領域 B と噴出流を意味する。

プラントの解析計算では、まずプラントの定常状態の設定を行い、その後に 1 次系の冷却材ポンプに摂動を加えてプラント全体の熱流動の過渡変化を計算する。ここで用いる 1 次系ポンプのモデルは、順流方向のみの流れの変化を考慮し、ポンプインペラの速度変化は次式で与えられる。

$$I \frac{d\Omega}{dt} = T_m - T_{hyd} - T_{fr} \quad (A-3)$$

ただし、
 I : ポンプインペラの慣性
 Ω : インペラ角速度
 T_m : モータトルク
 T_{hyd} : 水力学トルク
 T_{fr} : インペラの摩擦トルク

本解析では、 T_{fr} は無視し、 T_m の時間変化を次式により与えて、1次系流量の変化を求める。

$$T_m = (T_{m0} - T_{mc}) \exp\left(-\frac{t}{T}\right) + T_{mc} \quad (A-4)$$

ただし、
 T_{m0} : 初期定格値
 T_{mc} : 漸近値、
 T : 時定数

1次系流量は、1次系冷却材流路を一巡するループ圧損とポンプヘッドがバランスするように決まるので、ループ圧損を計算することが必要であるが、本解析で用いたポンプモデルでは、冷却材回路を構成するエレメントごとに、流れの運動方程式を解いてループ一巡の圧損を計算する。第jエレメントでの運動方程式は次式で与えられる。

$$L_j \frac{dW_j}{dt} + a_j (P_{ex}^j - P_{in}^j) + \rho_j g a_j L_j \sin \theta_j + \frac{f_j L_j W_j W_j}{2 a_j \rho_j D_{hj}} = 0 \quad (A-5)$$

ただし、
 L_j : 長さ、
 a_j : 断面積
 θ_j : エレメントの傾斜角
 g : 重力加速度、
 f_j : 摩擦係数
 D_{hj} : 等価流路直径、
 W_j : 流量

なお、 f_j はレイノルズ数依存性を考慮する。

(1) 初期定常設定

プラントの初期設定では、まず1次系ループ一巡後の冷却材の温度バランスをとる繰返し計算が必要となる。そこでMSSからループ一巡の温度計算を行うためのモジュール群を選択し、図A-2に示す論理的な流れの定常計算用プログラムをSESS-1により作成した。図中の定常計算用モジュールの機能を略述する。

SREACT	: 反応度バランス
SNTPR	: 即廃中性子レベル
SDECP	: FP残留熱
STPOWER	: 炉心内チャンネルの軸方向出力分布
SCORET	: 炉心単チャンネル熱流動
SBYPAS	: 炉心バイパス部熱流動

SLPLEN : 下部プレナム熱計算
 SUPLEN : 上部プレナム熱計算
 SPIPE : 配管内熱計算
 SIHX : 中間熱交換器内熱流動

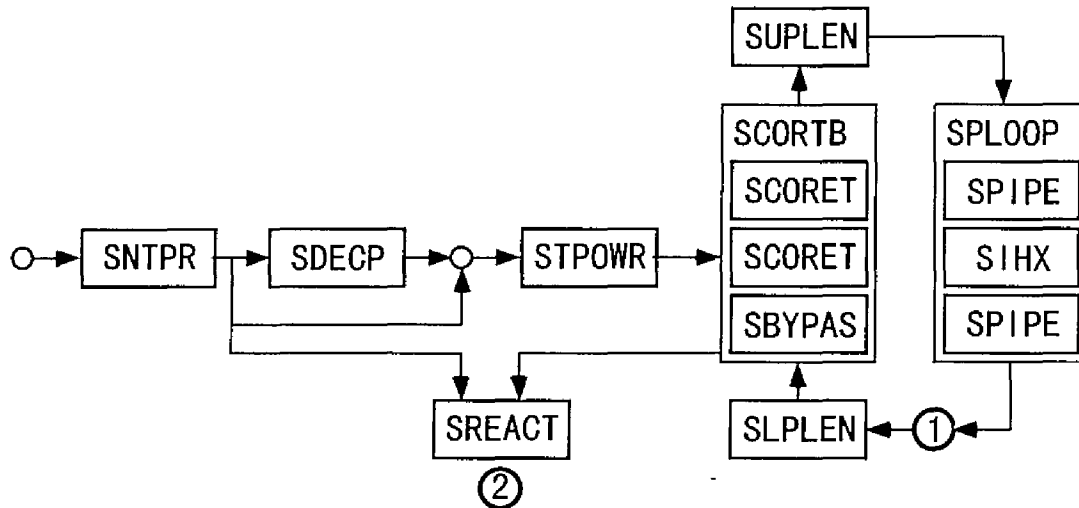


図 A-2 LMFBF 1次系の定常温度設定のためのフロー図

また、図中の SCORTB、SPLOOP は、モジュール階層化用プリプロセサ SPGEN で枠内のモジュールを予め統合したものである。なお、これらのモジュール名の先頭の S をとったものは、過渡モジュール名に対応する。

定常温度設定は、図に示したように、①、②の所で計算のループが切断されている。すなわち、①の所では、下部プレナムから始まる冷却材回路を一巡して、コールドレグ配管から出てきた Na 温度が、SLPLEN の入口温度に一致するように、SIHX の所で 1 次系流量、2 次系流量および入口温度を調整する。なお、使用するモジュールでは、炉心燃料棒、配管部管壁および中間熱交換器伝熱管と Na 冷却材との熱伝達モデルには、Lyon-Martinelli の式^[2]を用いている。また、②の所では、次式で与えられる初期定常時の炉心フィードバック反応度 ρ_f をゼロとするため、燃料ペレットおよび冷却材の炉心平均温度 T_f^0 、 T_c^0 を求める。

$$\rho_f = \alpha_f \ln \left(\frac{T_f}{T_f^0} \right) + \alpha_c (T_c - T_c^0) \quad (\text{A-6})$$

ただし、 T_f 、 T_c はおのおの燃料ペレット、冷却材の炉心平均温度であり、添字 0 は反応度計算のための基準値を意味する。平均温度フィードバック係数 α_f (燃料)、 α_c (冷却材) はともに $-5 \times 10^{-7} \Delta k / k / ^\circ\text{C}$ とする。なお、①の方は、定常条件を満足するため何回もの試行錯誤の計算が必要で、その結果、中間熱交換器の条件として図 A-3 に示すような伝熱流路条件を得た。

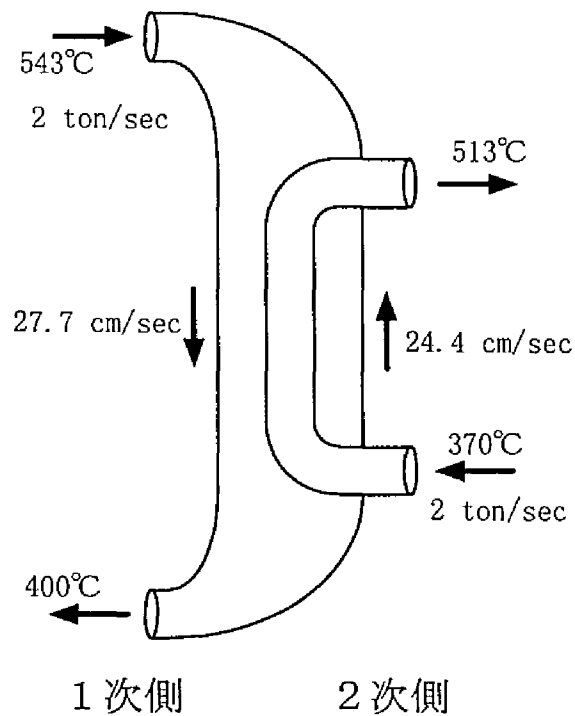
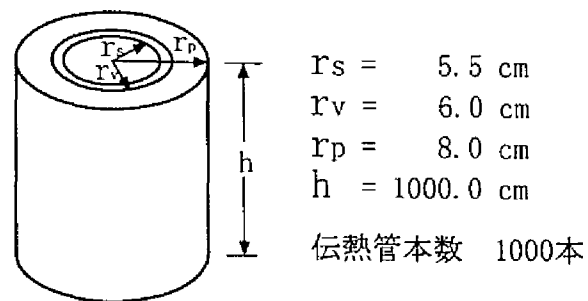


図 A-3 中間熱交換器の定常伝熱流動条件の設定結果

以上のように温度設定を行なった後に、冷却材流路の流動条件に合わせるための 1 次系ポンプの特性の設定を行う。すなわち、(A-5) 式での各エレメントごとの圧損計算からループ圧損を計算し、これに合わせるように定常時ポンプヘッドを求める。ループ圧損を求める上では、プレナム部のような大容積の部分では摩擦圧損効果を見捨てることとして、図 A-4 に示す形でループ一巡の圧損をポンプの定常計算を行うモジュールにより、上述の定常温度計算結果から各エレメントの温度条件と幾何条件を用いて計算し、定常時のポンプヘッド値として 5.2m を得た。以上により、初期定常設定の計算が終了した。

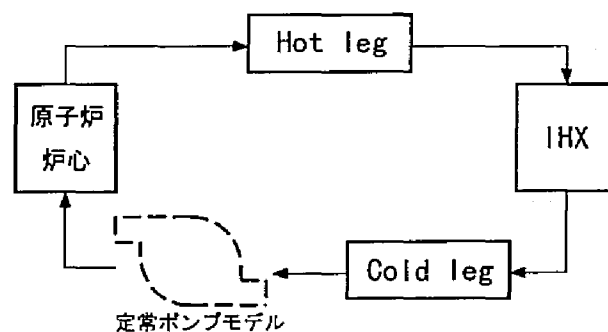


図 A-4 LMFBF 1 次系ループ一巡圧損を設定するためのフロー図

(2) 過渡解析

過渡計算では、Na 温度、反応度、ポンプ流動特性の点から分離されていた定常計算を一体化するとともに、過渡外乱のためのポンプのモータトルクの変化を与えるモジュール TORQUE をも組み込んだプログラムを SESS-1 で作成した。

図 A-5に、初期定常設定から過渡計算に至るための総合化したシミュレーションプログラムのロジックフローを示す。図中のモジュールは、過渡モジュール名のみで代表している。過渡計算時の計算時間刻み幅制御は、核動特性計算は細かい刻み幅 (0.05 s)、その他の熱流動計算は粗い刻み幅 (0.5 s) とする、2 レベルのスキームとした。

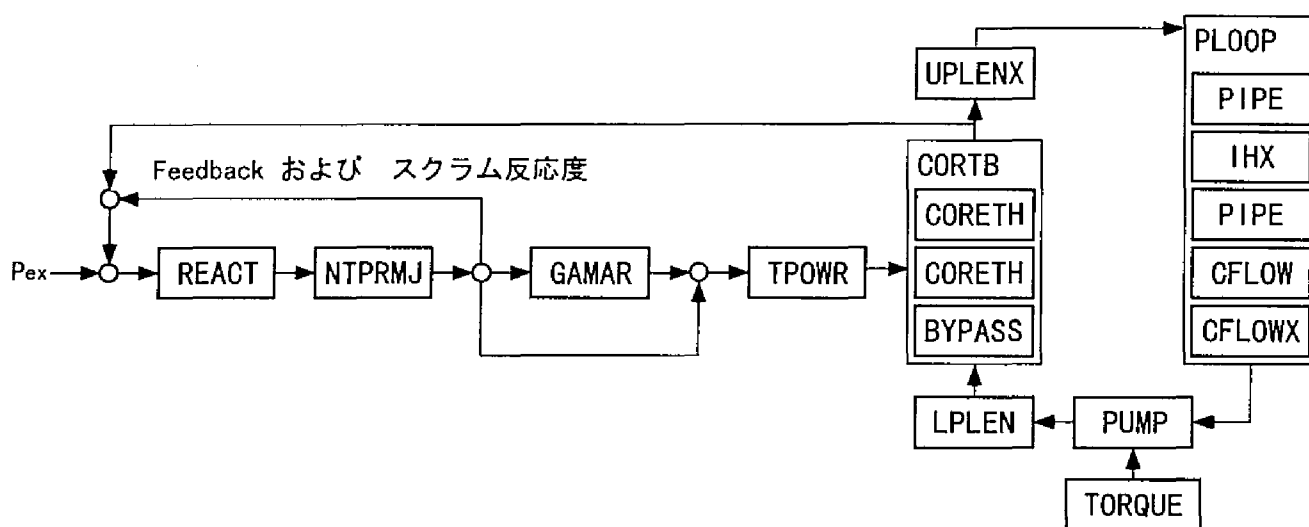
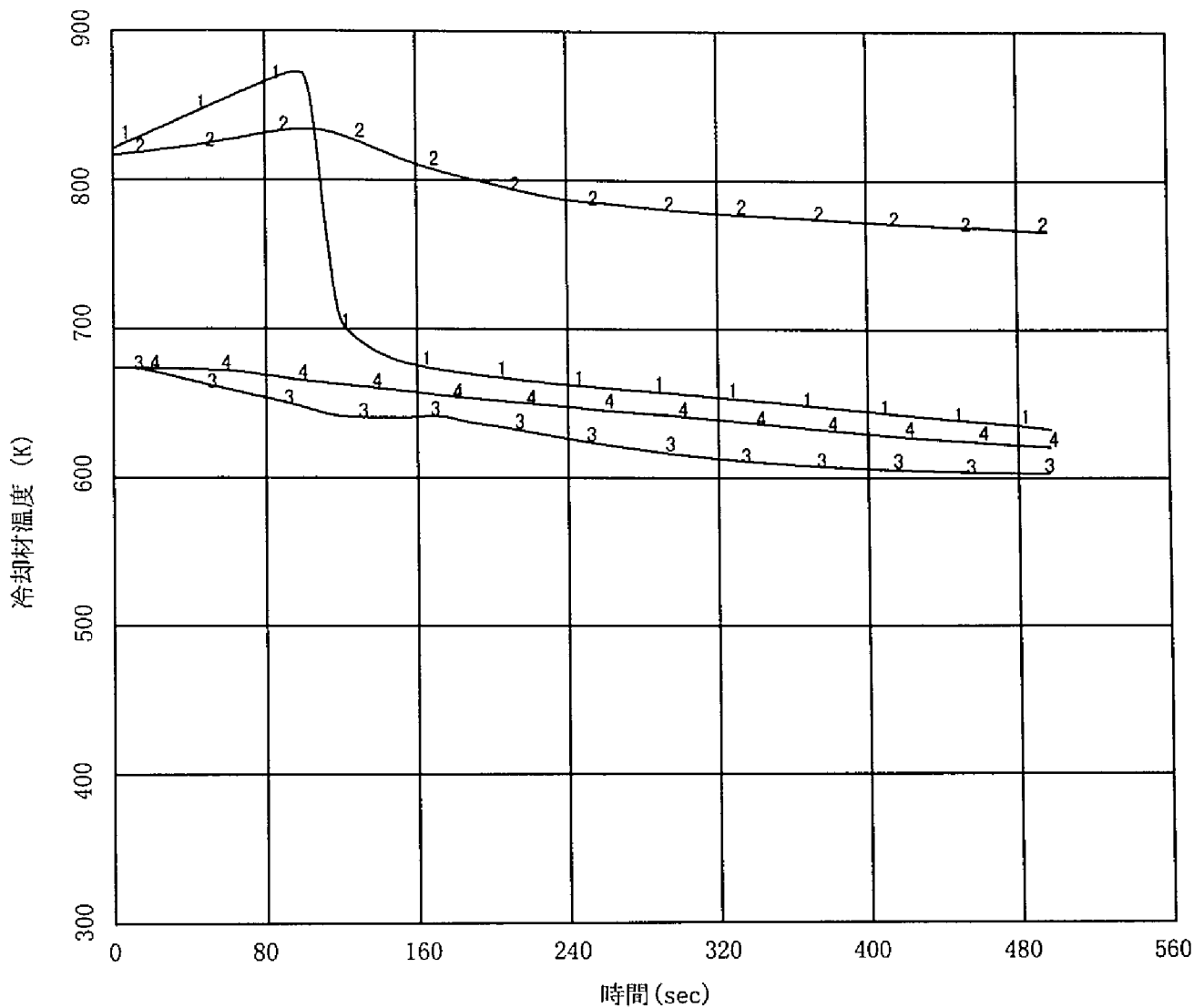


図 A-5 LMFBFR 1次系過渡解析プログラムのフロー図

過渡計算の試行例として、(A-6)式で表わされるモータトルクの時間変化について、漸近値 T_{mc} を定格値 T_{m0} の10%、時定数 T を100 sとして計算を行なった。以下、500 s間のプラント過渡挙動の計算結果を説明する。

ポンプヘッドの減少に伴う 1 次系流量の低下により、原子炉の冷却材温度が上昇し、98.7 s 後に原子炉スクラム条件の出口温度制限値 600℃に達して原子炉がスクラムする。1 次系ループ回りの冷却材温度の時間変化は、炉心出口、上部プレナム、低温配管、下部プレナムについて、図 A-6 のようになるが、上部プレナムの出口温度が原子炉スクラムの直後に僅かながら階段状の変化を示している。これは、上部プレナム内での噴出流の浸透高さ $Z_j(t)$ 、領域 A、B の Na 温度 T_A 、 T_B の時間変化に関係している。本計算では、上部プレナムでの出口配管（ノズル）の高さを 2.5 m としているが、この図に示すように、 $Z_j(t)$ は初期液面高さ 4 m（プレナム全高と同じ）から、原子炉スクラム直後の炉心冷却材温度急減による冷却材密度増加のため急減少し、すぐに出口ノズル高さ以下となる。すなわち、 Z_j が出口ノズル高さ以下となるとプレナム出口温度は、 T_B から T_A に切り換わる。 Z_j 低下のため温度成層化は、 T_A 、 T_B の温度変化の相違として図 A-7 に現れるが、 T_A 、 T_B の温度差はこの場合たかだか 5℃程度であり、熱衝撃はそれほど問題とは思わないと思われる。



1: 炉心出口、 2: 上部プレナム出口、 3: コールドレグ配管、 4: 下部プレナム

図 A-6 1次系ループ回りの冷却材温度の時間変化

以上の上部プレナムでの温度成層化の効果を検討する SESS-1 を用いた LMFBR 熱過渡解析では、まず①初期定常設定と、その後の②過渡解析のケーススタディで何回もプログラムの生成を行なっている。

①では1本の大型プログラムで計算を行うのではなく、設定すべき問題を分割して、焦点を小さくした定常用プログラムを SESS-1 により個々に作成して定常値の整合をとっている。これは既製の大型プログラム（往々にして定常計算機能のないプログラムがある）による場合に比し、見通しよく解析が進められ、目的を達成する上で作業効率もよい。

そして、確実に初期定常条件を抑えた後に、②では、定常設定計算を一体化した後に、過渡計算に接続できる大型のプログラムを SESS-1 で自動作成する。このようにして大型プログラムを作っておくと、大型コードによる過渡計算でよく経験する外乱印加後の計算の発散を避けることができる。

以上の解析事例では、モジュールをベースに問題に対応して、プログラムを段階的に幾つも作って解析作業を進める方法をとっているが、SESS-1 の使用によりプログラム作成はほとんどコンピュータが行うので、この点では、時間的な負担はかからなかった。すなわち、「解析モデル」（モジュール）と

問題に対応した「モデルの組立て方」とが問題の解決の上で本質的であると考えて、その本質に即したプログラムを適宜作成していける点が、MSSによるシミュレーションの1つの特長と考えている。また、以上の解析計算作業では、3段階のプログラム作成、反復計算による定常設定のための入力パラメータの探索を含めた個々のプログラムへの入力データの設定、試行錯誤の伴った計算実行および過渡解析計算結果のSPLPACKによるグラフ化の全体を、1人の解析者が5日間の作業で行なった。

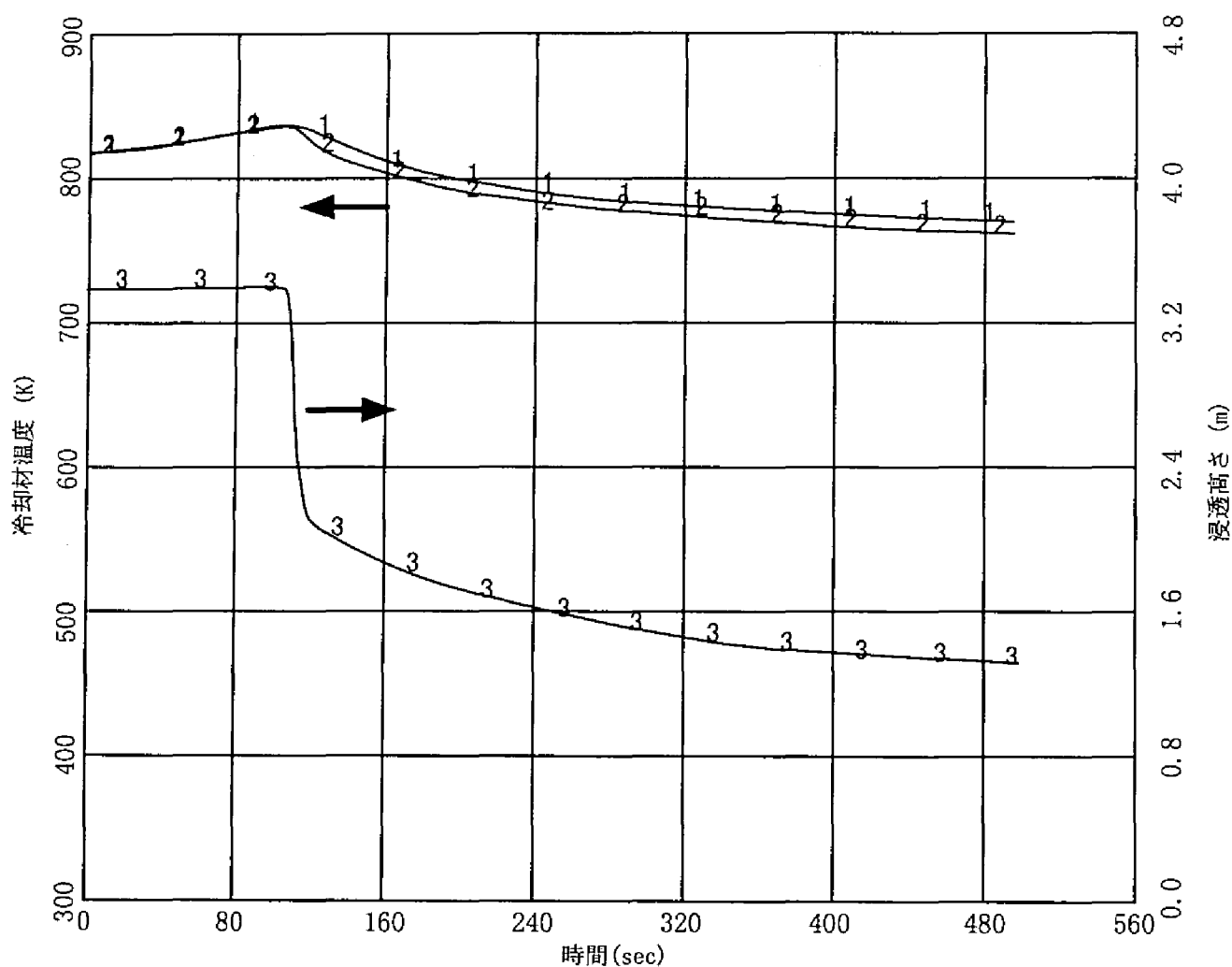


図 A-7 上部プレナムでの噴出流の浸透高さ(3)、領域A、Bの温度(1,2)の時間変化

付録A 参考文献

- [1] J.W.Yang: Trans. American Nuclear Society, No.23, 1976, p.23.
- [2] M.M.El-Wakii, 西原英晃訳: 「原子炉の熱工学」, 同文書院, 1977, p.245.

付録A 図表リスト

図 A-1	LMFBR 上部プレナムモデルの概念図	付録A-2
図 A-2	LMFBR 1 次系の定常温度設定のためのフロー図	付録A-4
図 A-3	中間熱交換器の定常伝熱流動条件の設定結果	付録A-5
図 A-4	LMFBR 1 次系ループ巡圧損を設定するためのフロー図	付録A-5
図 A-5	LMFBR 1 次系過渡解析プログラムのフロー図	付録A-6
図 A-6	1 次系ループ回りの冷却材温度の時間変化	付録A-7
図 A-7	上部プレナムでの噴出流の浸透高さ(3)、領域 A、B の温度(1,2)の時間変化	付録A-8
表 A-1	LMFBR 1 次系熱過渡解析の主要計算条件	付録A-1

付録B TFE セルでの伝熱特性と電気出力の計算モデル

TFE セルのエミッタ・コレクタ間での熱電子発電による変換効率を次式で与える。

$$\gamma = \frac{P_0}{P}$$

ただし、 P は TFE セルの熱出力、 P_0 は TFE セルの電気出力である。図 B-1 に示すような 1/8 円周のセル内での伝熱特性計算と熱電子変換発電の計算を行う。

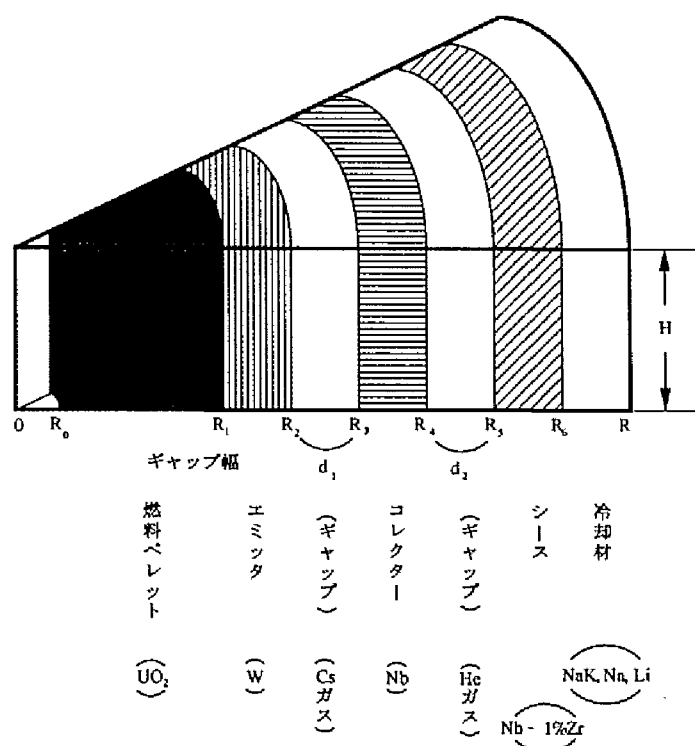


図 B-1 1/8 円周の TFE セル概念図

なお、伝熱特性計算のためのメッシュ分割図を図 B-2 に示し、以下の式の誘導における主な記号の意味については表 B-1 から表 B-4 までに示す。

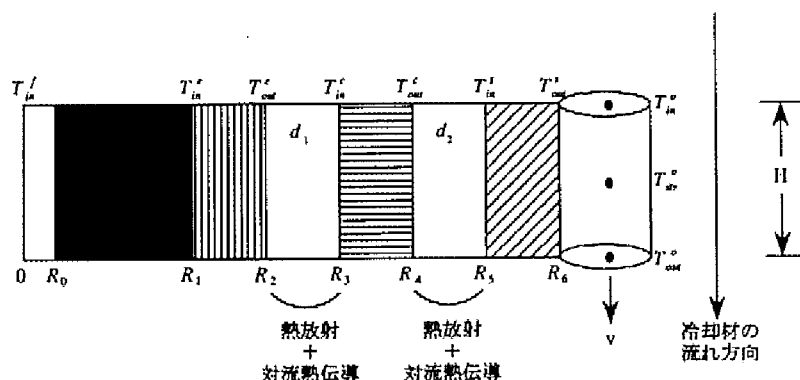


図 B-2 TFE セル内の伝熱特性計算のためのメッシュ図

表 B-1 TFE 計算に必要な数学定数および物理定数

φ_c	冷却材密度
c_o	冷却材比熱
h_s	熱伝達計数
k_s	シース(Nb - 1% Zr)の熱伝導度
k_{s2}	He ガス熱伝導度
ε_2	He ガス emissivity
k_c	コレクタ(Nb)の熱伝導度
k_{s1}	Cs ガス熱伝導度
ε_1	Cs ガス emissivity
k_e	エミッタ(W)の熱伝導度
k_f	燃料ペレットの熱伝導度
σ	Stephan-Boltzman 定数

表 B-2 TFE 計算モデルにおける入力条件に関する変数の意味

T_{in}^o	冷却材入口温度
P	燃料での熱出力
γ	熱電子発電の効率

表 B-3 TFE 計算モデルにおける出力に関する変数の意味

T_{ex}^o	冷却材平均温度
T_{s2}^o	シース外側温度
T_{s1}^i	シース内側温度
T_{s2}^i	コレクタ外側温度
T_{s1}^i	コレクタ内側温度
T_{e2}^o	エミッタ外側温度
T_{e1}^i	エミッタ内側温度
T_f^i	燃料中心温度
T_{ex}^o	冷却材出口温度

表 B-4 TFE 計算に必要な幾何変数の意味

R_o	中心空孔の半径
R_1	エミッタ内径
R_2	エミッタ外径
R_3	コレクタ内径
R_4	コレクタ外径
R_5	シース内径
R_6	シース外径
H	TFE セルの高さ
R	流路等価半径
v	冷却材流速

TFE の両側の絶縁物の厚さは無視すると、燃料ペレット内での熱出力は次式で与えられる。

$$P = q \cdot \frac{1}{8} \pi (R_1^2 - R_o^2) \cdot H$$

ただし、 q は発熱密度である。流れ方向のセル内発熱密度分布は、SRAC による炉心核計算によって与えられる。また、冷却材の等価流路断面積 A は、次式で表される。

$$A = \frac{1}{8} \pi (R^2 - R_6^2)$$

B.1 伝熱特性計算のモデル

まず、計算の準備として表面熱流束について以下のように与える。

R_1 での表面熱流束 q_1' :

$$q_1' \times \frac{1}{8} \cdot 2\pi R_1 \cdot H = P$$

R_2 での表面熱流束 q_2' :

$$q_2' \times \frac{1}{8} \cdot 2\pi R_2 \cdot H = P$$

R_3 での表面熱流束 q_3' :

$$q_3' \times \frac{1}{8} \cdot 2\pi R_3 \cdot H = P - P_0 = P \left(1 - \frac{P_0}{P} \right) = P(1 - \gamma)$$

R_4 での表面熱流束 q_4' :

$$q_4' \times \frac{1}{8} \cdot 2\pi R_4 \cdot H = P - P_0 = P(1 - \gamma)$$

R_5 での表面熱流束 q_5' :

$$q_5' \times \frac{1}{8} \cdot 2\pi R_5 \cdot H = P(1 - \gamma)$$

R_6 での表面熱流束 q_6' :

$$q_6' \times \frac{1}{8} \cdot 2\pi R_6 \cdot H = P(1 - \gamma)$$

a. 冷却材への熱伝達

冷却材流量は

$$W = \rho l \cdot v \cdot A$$

で与えられる。ここで、 ρl は冷却材密度、 v は冷却材流速である。冷却材比熱を C_0 とすると、冷却材に与えられる熱流束は、

$$WC_0(T_{out}^0 - T_{in}^0) = q_6' \times \frac{1}{8} \cdot 2\pi R_6 \cdot H = P(1 - \gamma)$$

となる。従って、セル内冷却材平均温度は、上2式から、

$$T_{av}^0 = \frac{1}{2}(T_{out}^0 + T_{in}^0)$$

で与えられ、

$$T_{av}^0 = T_{in}^0 + \frac{P(1 - \gamma)}{2WC_0} \quad (B-1)$$

となる。また、セル出口温度は、次式で与えられる。

$$T_{out}^0 = 2T_{av}^0 - T_{in}^0 \quad (B-2)$$

b. シース・冷却材間熱伝達

シース・冷却材間熱伝達については、

$$q_6' = h_s (T_{out}^s - T_{av}^s)$$

$$q_6' \cdot \frac{\pi}{4} R_6 \cdot H = P(1-\gamma)$$

から

$$T_{out}^s = T_{av}^0 + \frac{P(1-\gamma)}{h_s \cdot \frac{\gamma}{4} \cdot R_6 \cdot H} \quad (B-3)$$

となる。ここで、 h_s は熱伝達係数である。

c. シース内熱伝達

シース内では発熱がないので、

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r k_s \frac{dT_s}{dr} \right) = 0$$

の熱伝達方程式が成り立つ。ここで、 k_s はシース内の熱伝達度である。これを、 $r = R_5$ 及び $r = R_6$ での温度 T_{in}^s 、 T_{out}^s 、また、

$$\left[-k_s \frac{dT_s}{dr} \right]_{R_5} = q_5' \rightarrow C_1 = -q_5' R_5$$

$$q_5' \times \frac{\pi}{4} R_5 \cdot H = P(1-\gamma)$$

を用いて整理すると

$$T_{out}^s = T_{in}^s + \frac{4}{k_s \pi H} \ln \left(\frac{R_6}{R_5} \right) \cdot P(1-\gamma) \quad (B-4)$$

となる。

d. ギャップ d_2 内

ギャップ内での熱伝達、熱輻射は、

$$q_4' = \frac{kg_2}{d_2} (T_{out}^c - T_{in}^s) + \varepsilon_2 \cdot \delta \cdot \left\{ (T_{out}^c)^4 - (T_{in}^s)^4 \right\}$$

で与えられる。ここで、 kg_2 はHeガス熱伝導度、 ε_2 はemissivity、 δ はStephan-Boltzman定数、 $d_2 = R_5 - R_4$ である。

$$q_4' = \frac{4P(1-\gamma)}{\pi R_4 H}$$

を用いると、

$$q_4' = \frac{kg_2}{d_2} (T_{out}^c - T_{in}^s) + \varepsilon_2 \cdot \delta \cdot \left\{ (T_{out}^c)^4 - (T_{in}^s)^4 \right\} = \frac{4P(1-\gamma)}{\pi R_4 H} \quad (B-5)$$

という T_{out}^c に対する4次方程式が得られる。

e. コレクタ内

シース内熱伝導と同様にして、

$$T_{in}^c = T_{out}^c + \frac{4}{k_c \cdot \pi H} \ln \left(\frac{R_4}{R_3} \right) P(1-\gamma) \quad (B-6)$$

が得られる。ここで、 k_c はコレクタ熱伝導度である。

f.ギャップ d_1 内

ギャップ d_2 と同様に次の4次方程式を解いて、 T_{out}^c を求める。

$$\frac{kg_1}{d_1} (T_{out}^c - T_{in}^c) + \varepsilon_1 \cdot \delta \cdot \left\{ (T_{out}^c)^4 - (T_{in}^c)^4 \right\} = \frac{4P(1-\gamma)}{\pi R_2 H} \quad (B-7)$$

ただし、 kg_1 はCs蒸気熱伝導度、 ε_1 はemissivity、 $d_1 = R_3 - R_2$ である。

g.エミッタ内

コレクタ内熱伝導と同様である。ただし、電気出力項は考えなくてもよい。

$$T_{in}^c = T_{out}^c + \frac{4}{k_e \pi H} \ln \left(\frac{R_2}{R_1} \right) P \quad (B-8)$$

ただし、 k_e はエミッタ熱伝導度である。

h.燃料ペレット内熱伝導

燃料ペレット内熱伝導の基礎式は、

$$\frac{1}{r} \left(\frac{d}{dr} r k_f \frac{dT_f}{dr} \right) = -q$$

で与えられる。ここで k_f は燃料ペレット熱伝導度である。これを変形すると、

$$\frac{d}{dr} \left(r k_f \frac{dT_f}{dr} \right) = -qr$$

$$r k_f \frac{dT_f}{dr} = -\frac{1}{2} q r^2 + C_1$$

$$\frac{dT_f}{dr} = -\frac{q}{2k_f} r + \frac{C_1}{k_f r}$$

となる。 $r = R_0$ で、 $\frac{dT_f}{dr} = 0$ となることを考えると、

$$-\frac{q}{2k_f} R_0 + \frac{C_1}{k_f R_0} = 0$$

$$C_1 = \frac{q}{2} R_0^2$$

となる。これを代入して、

$$\frac{dT_f}{dr} = -\frac{q}{2k_f} r + \frac{q}{2k_f} R_0^2 \cdot \frac{1}{r}$$

$$T_f = -\frac{q}{4k_f} r^2 + \frac{q R_0^2}{2k_f} \ln r + C_2$$

$r = R_0$ で、

$$T_{in}^f = -\frac{q}{4k_f} R_0^2 + \frac{qR_0^2}{2k_f} \ln R_0 + C_2$$

$r = R_0$ で、

$$T_{in}^e = -\frac{q}{4k_f} R_1^2 + \frac{qR_0^2}{2k_f} \ln R_1 + C_2$$

となる。上の2式より、

$$T_{in}^f = T_{in}^e + \frac{q}{4k_f} (R_1^2 - R_0^2) + \frac{qR_0^2}{2k_f} \ln \frac{R_0}{R_1}$$

となる。熱出力の式

$$P = q \cdot \frac{1}{8} \pi (R_1^2 - R_0^2) \cdot H$$

を代入して、

$$T_{in}^f = T_{in}^e + \frac{2P}{\pi H k_f} + \frac{qR_0^2}{2k_f} \ln \frac{R_0}{R_1} \quad (\text{B-9})$$

T_{in} 、 P を仮定すると、(B-1)、(B-3)、……、(B-9)式の順に解けば伝熱特性からセル内の温度分布が求められ、更に(B-2)式により、セルの出口冷却材の温度が与えられる。これを、流れ方向の次のTFEセルの入口温度 T_{in} とすれば次のTFEセルのメッシュの温度分布が同様の手順で求めることができる。

B.2 エミッタ・コレクタ間の熱電子発電モデル

エミッタとコレクタ間の熱電子発電効果をモデル化するため、図B-3のようなモデルを考える。

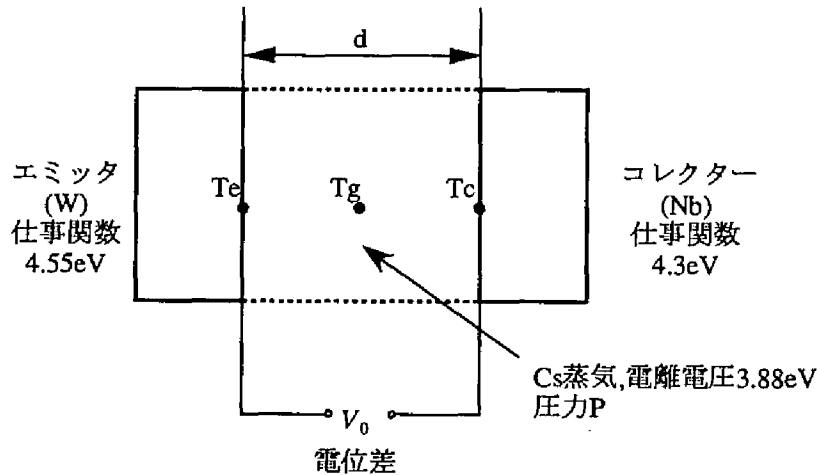


図 B-3 エミッタとコレクタ間の熱電子発電効果のモデル

但し、ガス温度は、次式で与える。

$$T_g = \frac{1}{2} (T_e + T_c)$$

エミッタとコレクタの仕事関数を $e\phi_e$ 、 $e\phi_c$ 、封入ガス(Cs)の電離電圧 V_i とすると、エミッタでの単位表面積当たりの放出電流 J_e (J_s :飽和電流)は、

$$J_e = J_s = AT_e^2 \cdot \exp\left(-\frac{e\phi_e}{kT_e}\right) \quad (\text{A/m}^2) \quad (\text{B-10})$$

のように、 $T_e(K)$ を与えると定まる。ただし、 A はリチャードソン定数で、次式で表される。

$$A = \frac{4\pi m_e k^2}{h^3} = 1.20 \times 10^6 \quad (\text{A/m}^2 \cdot \text{K})$$

ここで、 m_e は電子質量、 h はプランク定数、 k はボルツマン定数である。また、電位差:

$$V_0 = \phi_e - \phi_c \quad (\text{V})$$

エミッタ面積:

$$S = \frac{1}{8} \cdot 2\pi R_2 \cdot H = \frac{\pi}{4} R_2 H$$

あるので、熱出力から変換される電気出力は、

$$P_0 = V_0 J_e S \quad (\text{B-11})$$

で与えられる。

以上は、陰極近傍の放出電子による空間電化効果を考えていない(これを考えると、 $J_e < J_s$ となる)。この空間電荷効果をキャンセルするために電離電圧の低いCsガスを封入し、Csのイオン化により中和をはかる。

表面電離によるCsのイオン電流密度 I_s は次式で与えられると仮定する。

$$I_s = \frac{eP_{Cs}}{2} (2\pi m_i kT_e)^{-\frac{1}{2}} \cdot \exp\{-e(V_i - \phi_e)\} \quad (\text{B-12})$$

但し、 P_{Cs} はセシウム蒸気圧、 m_i はセシウム原子質量である。ここで、

$$a = \frac{I_s}{J_e} \left(\frac{m_i}{m_e} \right)^{\frac{1}{2}}$$

とすると、 $a=1$ がエミッタ付近での空間電荷の中和条件となる。このとき、

$$I_s = \left(\frac{m_e}{m_i} \right)^{\frac{1}{2}} J_e$$

(B-1)、(B-4)、(B-5)式を整理して、 P_{Cs} を求める式が導出される。またギャップ部の封入ガスの圧力 P を P_{Cs} として、次のサハの式から電離度 x を求めると、

$$\frac{x^2}{1-x^2} P = \frac{(2\pi m_i)^{\frac{3}{2}} k^{\frac{5}{2}}}{h^3} \cdot T_s^{\frac{5}{2}} \cdot \exp\left(-\frac{eV_i}{kT_s}\right) \quad (\text{B-13})$$

となる。しかし、電離度は低いことが考えられるため、ほとんど中性ガスとして、Csのモル数 N は理想気体の状態方程式を用いて求めることができる。また

ギャップの体積:

$$V = \frac{1}{8} \pi \{(R_2 + d)^2 - R_2^2\} \cdot H \approx S \cdot d$$

理想気体の状態方程式:

$$pV = NRT_g \quad (\text{B-14})$$

である。ただし、 R はgas-constantである。以上の式から、空間電荷効果を中和させるべきギャップ

圧力 P 、及び Cs の質量が求められる。

B.3 全体の計算の流れ

B.1に述べた伝熱特性計算では、熱出力 P とその分布が入力条件(出力分布は炉心核計算から求められる)になる。また、変換効率は熱電子発電計算から与えられる。一方、B.2に述べた熱電子発電計算では、 T_{out}^c 及び、 T_{in}^c が入力条件(これは伝熱特性計算から求められる)になる。従って、双方を満足する解は、図 B-4 のような流れ図により、発電効率に対する反復計算の収束解として求められる。

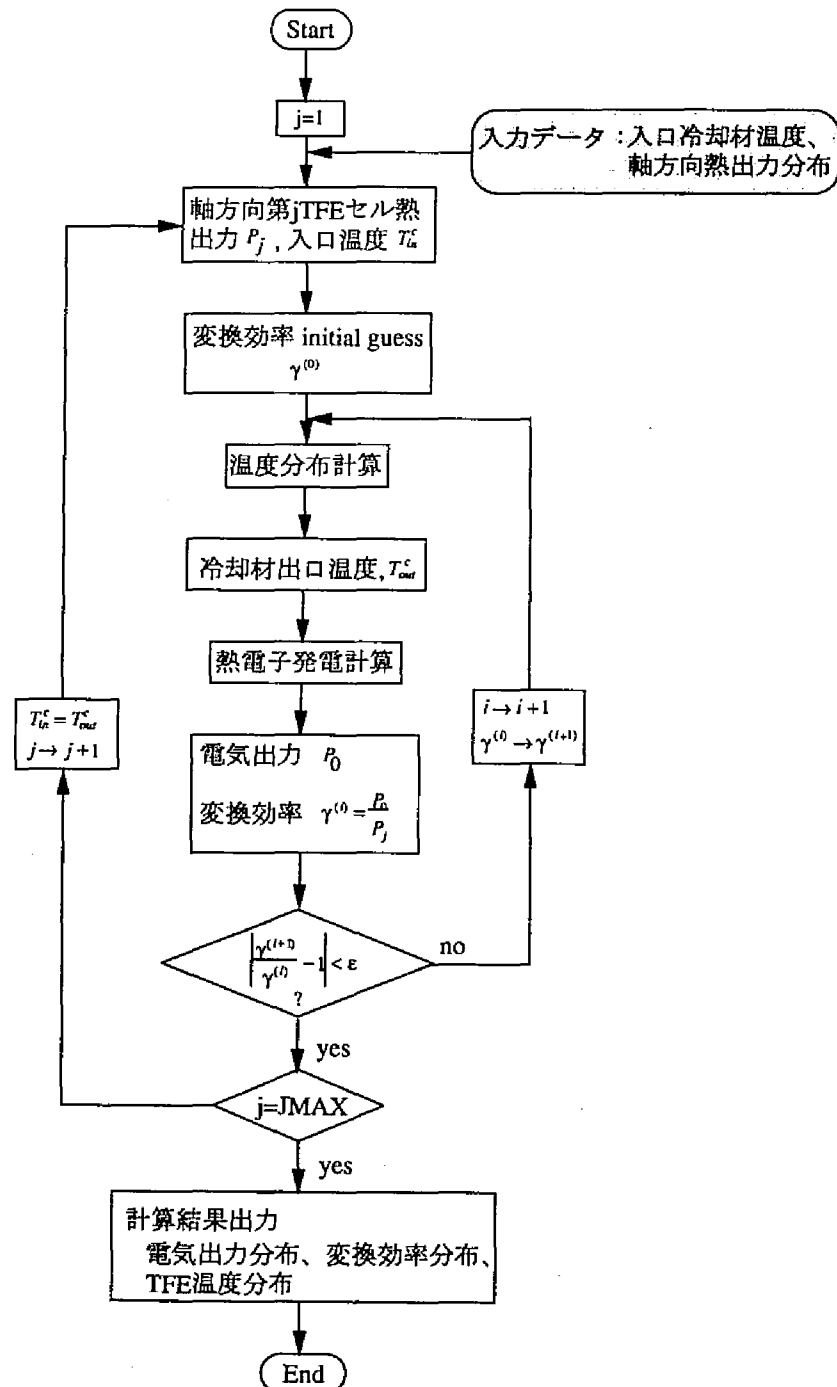


図 B-4 TFE プログラムの全体計算の流れ図

更に、動圧損 Δp を次式で求めている。

$$\Delta p = 2 \frac{H}{D_h} \rho v^2 \cdot f \quad (\text{B-15})$$

ただし、 H は流路長、 D_h は等価流路半径、 v は平均流速、 f は摩擦係数、 ρ は冷却材の密度、 μ は粘性係数である。摩擦係数 f の計算はレイノルズ数を

$$R_e = \frac{\rho v}{D_h \mu}$$

としたときに、

$R_e \leq 2100$ ならば、

$$f = \frac{16}{R_e}$$

$R_e \geq 2100$ ならば、

$$f = 0.0791 R_e^{-0.26}$$

として求められる。また、等価流路半径は

$$D_h = \frac{4 \times \frac{\pi}{8} (R^2 - R_0^2)}{\frac{\pi}{4} (R + R_0)} R_0$$

として求められる。

以上の計算モデルにより TFE セル内の各部の温度分布と発電効率を計算するプログラムを作成した。その後、以下の修正を行い、解析に用いる TFE 計算プログラムとした。

- 燃料ペレットにおいて中心空孔の取り扱いもできるようにした。
- 冷却材として NaK・Li・Na が考慮できるようにした。

付録B 図表リスト

図 B-1	1/8 円周の TFE セル概念図	付録 B-1
図 B-2	TFE セル内の伝熱特性計算のためのメッシュ図	付録 B-1
図 B-3	エミッタとコレクタ間の熱電子発電効果のモデル	付録 B-6
図 B-4	TFE プログラムの全体計算の流れ図	付録 B-8
表 B-1	TFE 計算に必要な数学定数および物理定数	付録 B-2
表 B-2	TFE 計算モデルにおける入力条件に関する変数の意味	付録 B-2
表 B-3	TFE 計算モデルにおける出力に関する変数の意味	付録 B-2
表 B-4	TFE 計算に必要な幾何変数の意味	付録 B-2

付録C 宇宙用原子炉の協同設計作業の実際

ここでは、構築した統合型設計支援システムを用いて実際にどのような流れで宇宙用原子炉の概念設計作業が進行するかについて検討する。設計作業の流れを図 C-1 に示す。

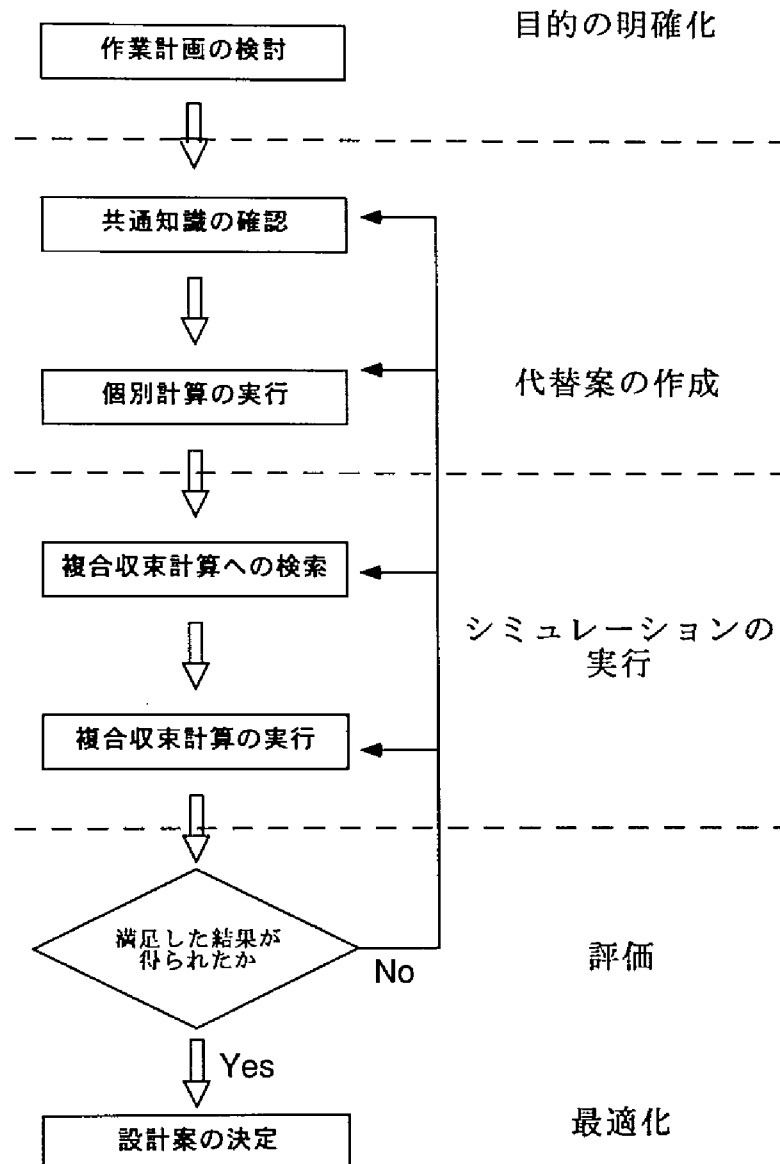


図 C-1 WINDS を利用した設計作業の流れ

以下の作業例は専門家の意見を参考にして想定したものである。実際には複数の部分目標に応じた作業が並行して進められるが、以下の例では複数ある部分目標のうちの一つについて、時系列に沿った作業状況を述べる。作業は必ずしも同期的な応答を必要とするものではなく、非同期的に進行するものとする。

C.1 前提

プロジェクトグループのメンバーは A・B・C・D の 4 人で構成される。A と B は熱材料分野の専門家で主に熱設計を担当し、C と D は炉物理分野の専門家で主に核設計を担当する。A はプロジェクト

グループを統合するリーダーである。C は A の補佐的な役割を果たす副リーダー的役割を果たす。B と D はそれぞれ A と C の部下であり、今回の炉心設計について初めて参加する。

部分目標としては、冷却材材質について NaK と Na のどちらが有効かを検討することに設定している。

C.2 実行例

作業計画の検討

まず初めに、掲示板で期限と目的が述べられる。プロジェクトリーダーである A が、以下のような掲示を掲示板に行う。

冷却材の材料として、経済的な理由で Li を用いることができないため、NaK か Na のどちらかを用いることにしたい。どちらが有効かを熱設計・核設計の双方の観点から検討する。期限は来週末までとする。尚、以後の進捗はニュースシステムの冷却材の欄に逐一報告すること。

共通知識の確認

今回の炉心設計に関して初めてプロジェクトに参加する B は、設計対象に対する共通の知識を得るために対象物体階層図を一つ一つ検討することにする。D もまた B と同様プロジェクトに初参加であり、TFE ピンの構成と炉心の 2 次元炉心体系を知るために、3 次元モデルを操作することにする。

各サブシステムについて、分からないことやもっと詳細について知りたいことは、ニュースの中の各サブシステムごとの欄に投稿することで、他のグループメンバーからの返答があった。例えば、B は以下のような記事を冷却材の欄に投稿した。

冷却材の流れによって炉心内の熱を除去することは理解した。冷却材の流速を上げることで更に冷却効果が上がるはずだ。しかし、その冷却材流速を上げるにはどのような機構で実現するのか。

A からの返答は以下のものであった。

冷却材流速を上げるために電磁ポンプを用いることで理論上はいくらでも流速を上げることが可能だ。しかし、流速上昇が物質の粘性等の影響により流体力学的にどのような効果を与えるかは、機械設計の専門家と相談して、TFE ピンや炉心内部ドラムを構成している材質に加えられる圧損などを調べなければならない。

個別の計算の実行

A は熱設計の観点から検討するために、まず、TFE 計算だけの計算を行うことにする。これにより TFE セルのパラメタについて結果の影響に関する感度やその他の気付いたことを、例えば以下のようにニュースに投稿した。

NaK は、Na よりも平均発電効率が上昇する傾向にあるが、沸点が比較的低いため冷却材入口温度を低く設定しなければならない。

C は炉心核設計の観点から検討するために SRAC の計算を行うことにする。彼は TFE セルのパラメタを一定の値にして炉心全体のパラメタについて変化させた時に関心を持った事柄を、例えば以下のよう
にニュースに投稿した。

ベッセルドラムに用いている AI の厚みを変えたところで、それほど炉心核計算の結果には影響がない。

A と C は、それぞれの設計パラメタについて上限値・下限値・中間値を設定して結果への影響を検討するが、最終的に検討結果を三つ程度の事例としてまとめる。

検索実行

A が C へ複合収束計算のための設計案作成を持ちかける。A が検討した TFE セルのパラメタと C が検討した炉心パラメタを組合わせて、複合収束計算のための設計パラメタ入力の設計案（10 個程度）とする。A は、これらの設計案に対して B と D に複合収束計算の検索作業を依頼する。

解析計算を実際に実行する前に、検索結果を検討することは問題解決のために有効である。B は注釈検索機構を用いて、熱設計・TFE 計算・冷却材種類などの着目点について検索を行い、過去の計算事例について検索された結果を参考にしながら修正を加えることにする。D は、A から与えられたパラメタに対して類似性検索を用いて事例を検索することにする。B と D は検索結果を参照しながら、各々が複数の設計案を 2、3 個に絞り込む。

複合収束計算実行

B と D がお互いの結果を参考にしながら議論を行い、各人の設計パラメタに若干の修正を加えて、仮決定案（3 個程度）とする。そして仮決定案について複合収束計算を実際に実行することにする。

設計案の決定

最後に、全員での協議の末に本決定案が決定される。報告期日になって、B と D は最終的に得られた仮決定案とその計算結果を A と C に報告する。A は C との意見交換の結果、最終的な結論として本決定案を作成できる。

付録C 図表リスト

図 C-1 WINDS を利用した設計作業の流れ 付録 C-1

付録D 瞳孔面積測定用画像処理装置の回路

本装置のブロック図および回路図を図 D-1、図 D-2～図 D-5に示す。ここで、各回路について簡単に説明する。

(1)同期信号分離回路 図 D-2

ビデオコンポジット信号は、数 MHz におよぶ周波数帯域をもつため、信号を入出力する際には信号の終端処理が重要である。そのため、回路では $75\ \Omega$ の純抵抗を用い反射をなくしている。初段のトランジスタはインピーダンス変換回路であり、エミッタフォロワになっている。また、次段の同期分離トランジスタでは、ベースバイアス抵抗をカットオフ領域付近に選び、同期期間中のみ ON となるようにしている。これにより同期分離トランジスタの出力には、正極性の合成同期信号が得られる。この合成同期信号は水平同期信号と垂直同期信号が合成されているため、積分回路（ローパスフィルタ）によって垂直同期信号を取り出す。この積分回路の時定数は回路中の $10\text{k}\ \Omega$ と $0.047\ \mu\text{F}$ で決められる。また、水平同期信号の検出には、微分回路（ハイパスフィルタ）を用いてパルス幅を規定している。

(2)二値化回路 図 D-2

ビデオ信号の二値化には、前述のように高速コンパレータ LM319 を使用している。また、入力段を 4700pF の高周波特性のよいスチロールコンデンサで結合し、ダイオードで同期信号を分離している。一方、二値化の基準電位はツェナーダイオード RD4A で $\pm 4\text{V}$ に規定された電位差を分圧することにより得ている。LM319 の出力はオープンコレクタのため、抵抗でプルアップし NOT 回路を入れて TTL レベルに変換している。

(3)アドレスデコード回路 図 D-3

アドレスデコーダには、3 to 8 Demultiplexer である 74LS138 を 3 個用いて各チップセクタ信号をつくっている。このアドレスデコーダ回路では、アドレスバスの A8～A14 までをデコードしていないため I/O アドレスを指定する際には、A8～A14 は任意となる。

(4)ウインドウ位置指定 I/O ポートおよびステータスポート 図 D-3

ウインドウ位置指定 I/O ポートには、汎用パラレル I/O ポート 8255A を 2 個用いている。各 LSI には、8 ビットパラレル入出力ポートが 3 ポートついており、それぞれ 5 つのウインドウ位置指定と、問題指定用コンピュータからのデータ取り込み用となっている。また、ステータスポートには 3 State Bus Transceiver 74LS645 を用いている。下位から 4bit 目は、問題提示用コンピュータとのインタフェースのためのストロブ信号が入力される。

(5)面積（ドット数）カウンタおよび面積入力ポート 図 D-4

各ウインドウ内の黒いドット数を計数するために、それぞれ 4-bit Binary Counter 74LS393 を 2 個用いて非同期 16bit カウンタを構成している。このカウンタは、後に述べるウインドウ判別回路と二値化出力より各ウインドウ内で黒いドットがある場合に 1 ずつカウントアップされていく。このカウンタの出力は垂直同期信号でクリアされるが、その前に 3 State D-FF 74LS374 により垂直同期信号で

ホールドされる。そのため、ビデオコンポジット信号の各フィールドが終り、垂直同期信号が出力された時にそのフィールド中での各ウインドウ内のドット数がホールドされている。74LS374 は 3 State 出力のため、直接コンピュータのデータバスに接続されており、次のフィールドが終るまでデータを保持している。

(6)ウインドウ判別回路 図 D-5

ウインドウ判別回路は主に、現在の走査線の位置を示す 8bit のカウンタ 2 個と、走査線がウインドウ内にあるかどうかを判別する 4 bit Magnitude Comparator 74LS85 を 10 個、およびその比較出力から面積カウンタへの入力パルスをつくる 3 Input AND 74LS11 から構成されている。ここでは、水平方向の走査線の位置を 8bit で表すために基準クロックを 2 分周し水平走査線位置カウンタに入力している。また、1 ドット内で二値化出力が変化して面積カウンタに 2 回以上パルスが出るのを避けるため二値化出力を D-FF により基準クロックの立上りでホールドしている。

(7)モニタ画像生成回路 図 D-2、図 D-5

モニタ画像生成回路は、ウインドウ判別回路に用いたコンパレータの出力を 3 Input NOR 74LS27 と Quad 2 Input EX-OR 74LS86 により二値化画像に反転されたウインドウの端線を重畳させる。また、こうしてつくられたビデオ信号と各同期信号をオープンコレクタの NOT で結合し、トランジスタでインピーダンス変換して出力する。

(8)基準クロック発生回路

基準クロックには、25MHz の水晶発振子を用いた。発振周波数が高いため NOT1 個によるコルピッツ発振回路により発振させている。この出力をデューティサイクル 50% の 6.25MHz にするため前述の 74LS393 を用いて 4 分周している。

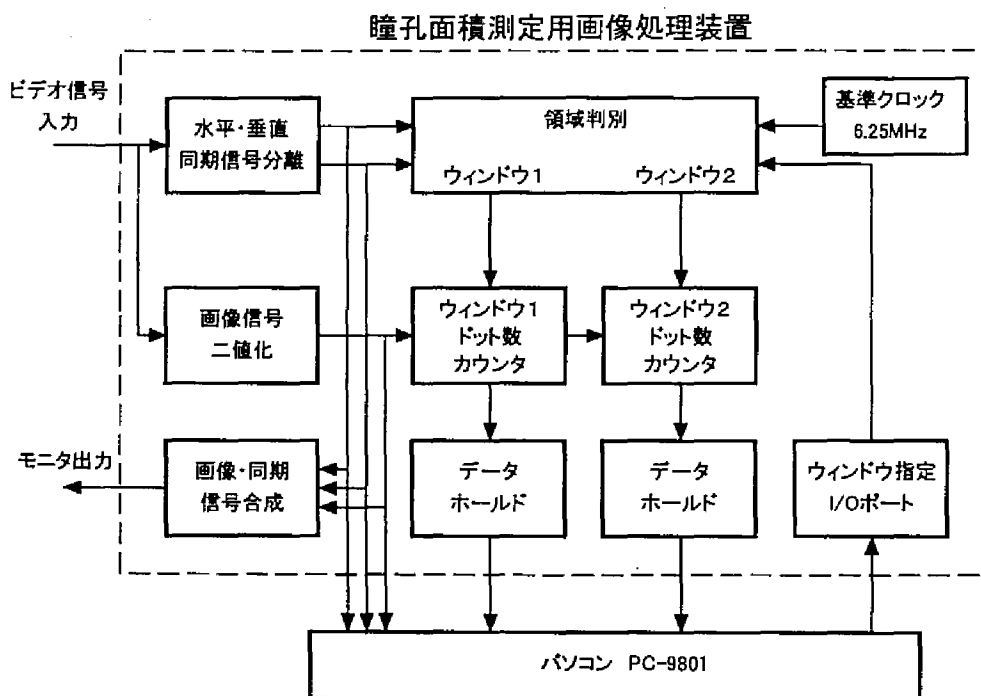


図 D-1 瞳孔面積測定用画像処理装置のブロック図

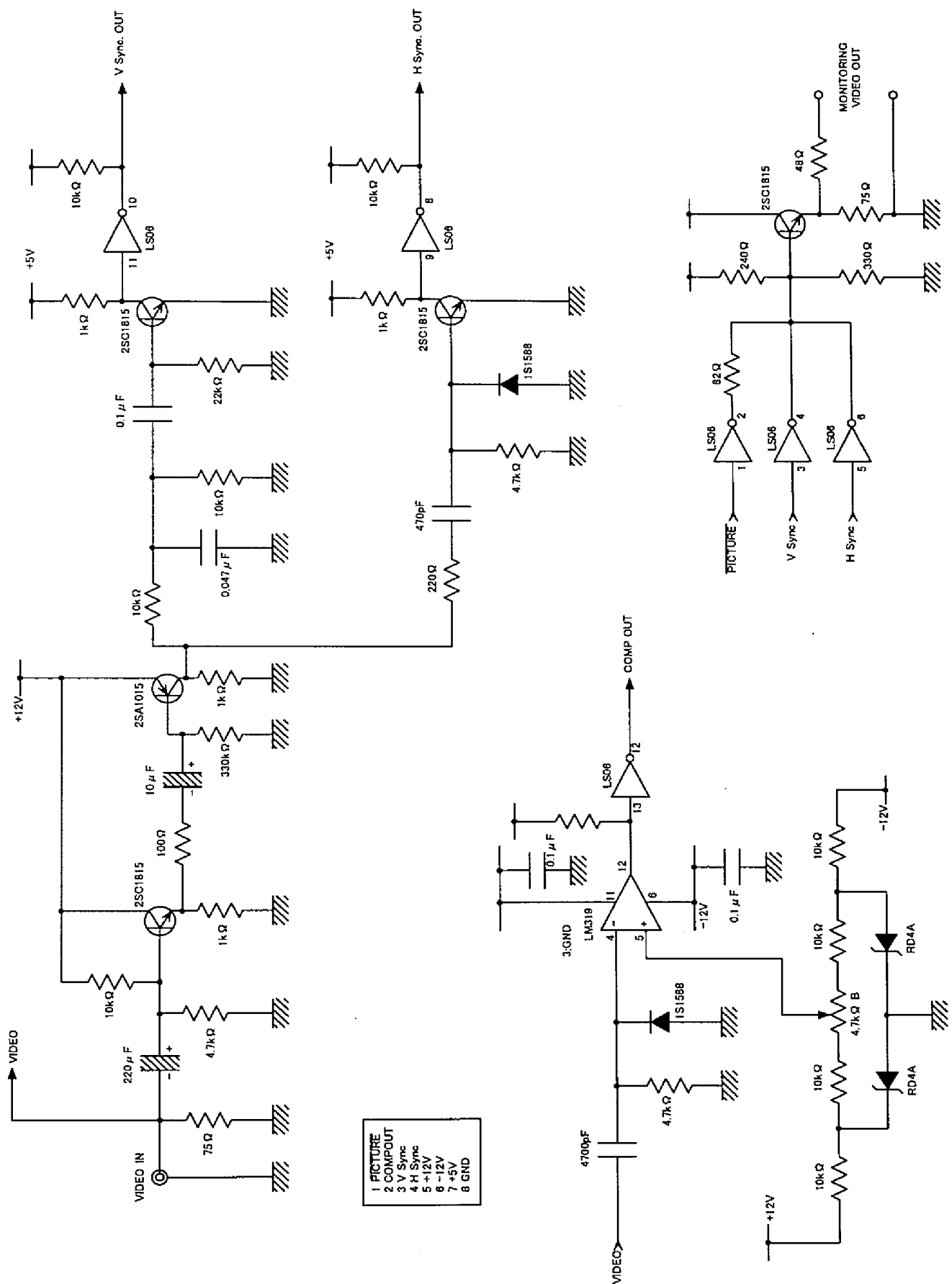


図 D-2 瞳孔面積測定用画像処理装置の回路図(1)

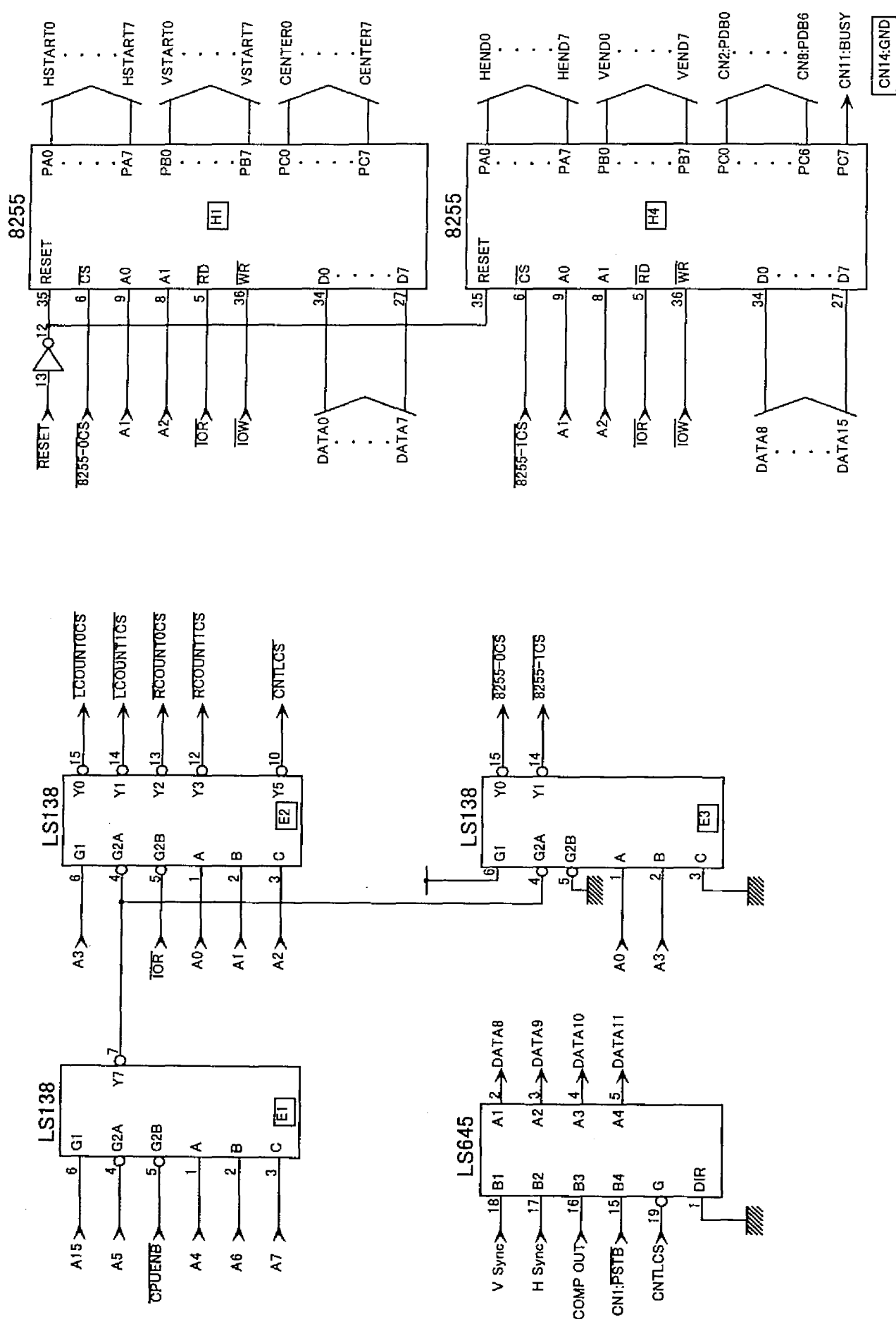


図 D-3 瞳孔面積測定用画像処理装置の回路図(2)

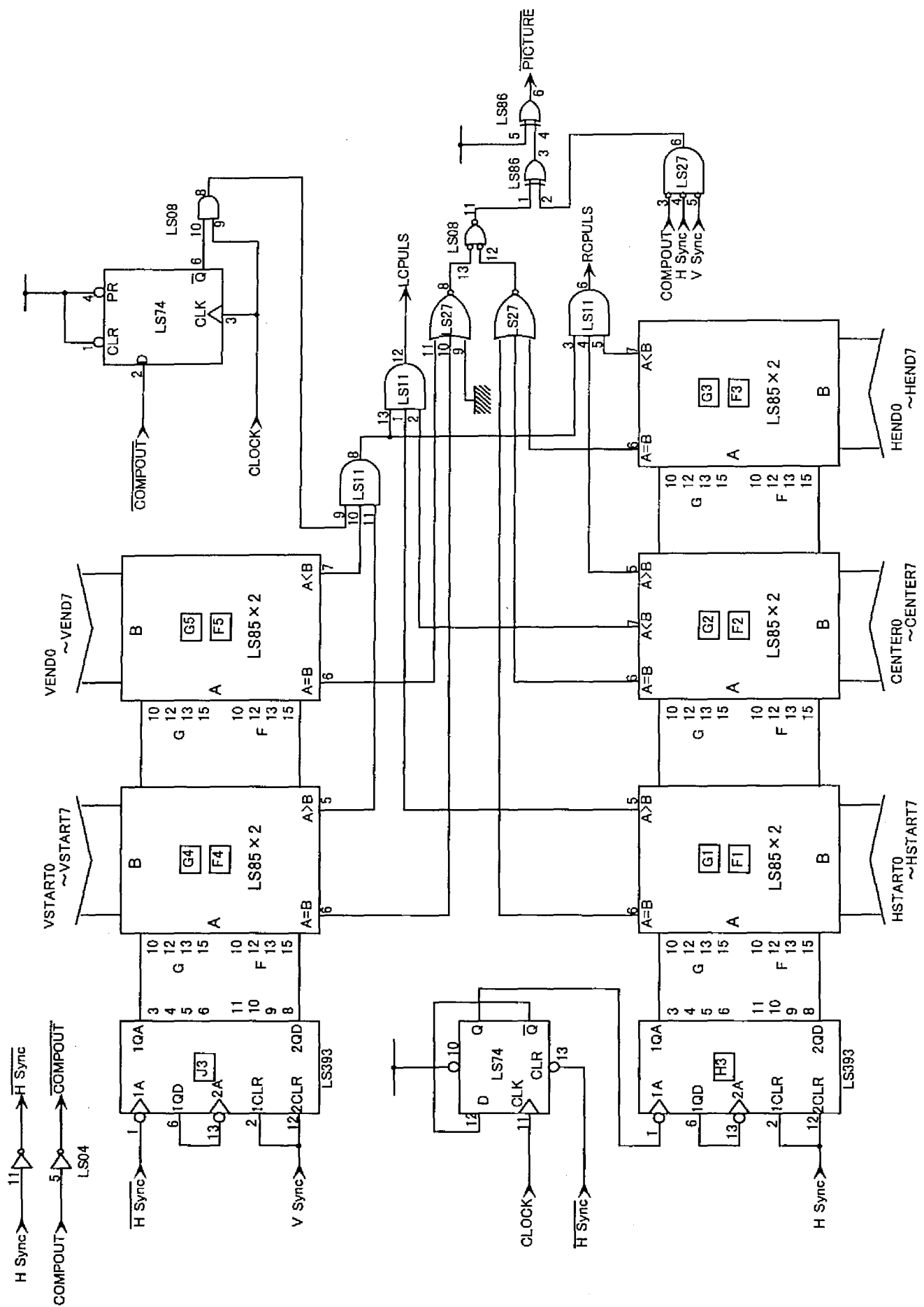


図 D-5 瞳孔面積測定用画像処理装置の回路図(4)

付録D 図表リスト

図 D-1	瞳孔面積測定用画像処理装置のブロック図	付録D-2
図 D-2	瞳孔面積測定用画像処理装置の回路図(1)	付録D-3
図 D-3	瞳孔面積測定用画像処理装置の回路図(2)	付録D-4
図 D-4	瞳孔面積測定用画像処理装置の回路図(3)	付録D-5
図 D-5	瞳孔面積測定用画像処理装置の回路図(4)	付録D-6